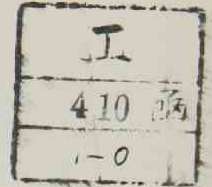


Title	火薬類の爆発にもとづく水中圧力波の性状ならびに水中圧力波が魚類に及ぼす影響に関する研究(Dissertation_全文)
Author(s)	小川, 輝繁
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	1978-07-24
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r3637
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author



火薬類の爆発にもとづく水中圧力波の
性状ならびに水中圧力波が魚類に及ぼ
す影響に関する研究

昭和 53 年 2 月

小 川 輝 繁

目 次

緒 論	1
第 1 節 緒 言	1
第 2 節 本研究に関連する従来の研究	1
2. 1 水中圧力波の伝播および性状に関連した研究	1
2. 2 水中圧力波が魚介類に及ぼす影響に関連した研究	2
第 3 節 本研究の目的と内容	5
第 1 篇 火薬類の爆発にもとづく水中圧力波の性状に関する研究	9
第 1 章 水中爆発に伴なう水中圧力波	9
第 1.1 節 緒 言	9
第 1.2 節 水中圧力波の測定装置	9
1.2.1 受 圧 素 子	10
1.2.2 測定系の構成	12
1.2.3 較 正 方 法	12
1.2.4 本測定方法について留意すべき点	14
(a) 高域周波数応答性	14
(b) 低域周波数応答性	17
(c) ケーブルのターミネーション	20
(d) ケーブルシグナル	21
第 1.3 節 雷管衝撃に伴なう水中圧力波の特性	21
1.3.1 実験装置および方法	21
1.3.2 実験結果および考察	24
(a) 圧力波形について	24
(b) 圧力最高値について	25
第 1.4 節 火薬および爆薬衝撃による水中圧力波の特性	36
1.4.1 実験装置および方法	36
1.4.2 実験結果および考察	38
(a) 圧力波形について	38

(b)	圧力最高値について	45
第 1.5 節	結 言	56
第 2 章	無自由面の水中せん孔爆破に伴う水中圧力波	60
第 2.1 節	結 言	60
第 2.2 節	実 験 方 法	61
第 2.3 節	実験結果および考察	61
2.3.1	圧力波の伝播経路	61
2.3.2	圧力波形の特徴と圧力の距離減衰	66
2.3.3	透 過 圧 力 値	70
第 2.4 節	結 言	75
第 3 章	一自由面の水中せん孔爆破に伴う水中圧力波	76
第 3.1 節	結 言	76
第 3.2 節	実 験 方 法	76
第 3.3 節	実験結果および考察	78
3.3.1	モルタルブロックの破壊状況	78
3.3.2	観測された圧力波の種類	79
3.3.3	ガス圧力波の波形的特徴	85
3.3.4	ガス圧力波と地盤-水圧力波の圧力値の比較	86
3.3.5	ガス圧力波の伝播特性	88
3.3.6	考察のまとめ	90
第 3.4 節	結 言	91
第 4 章	水中せん孔爆破に伴う水中圧力波に関する現場実験の解析	92
第 4.1 節	結 言	92
第 4.2 節	試験爆破の概要	92
第 4.3 節	水中圧力波の計測	93
第 4.4 節	実験結果の解析および考察	95
4.4.1	4 A 地点の試験爆破	95
(a)	圧力波形について	95
(b)	圧力の大きさについて	99
(c)	水中圧力波形におよぼす島の影響	100

4.4.2	7 A 地点の試験爆破	101
(a)	圧力波形について	101
(b)	圧力の大きさについて	103
4.4.3	基礎研究との関連	105
第 4.5 節	結 言	106
第 2 篇	水中圧力波による魚類の損傷に関する研究	107
第 1 章	水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷	107
第 1.1 節	緒 言	107
第 1.2 節	実 験 方 法	107
第 1.3 節	実験結果および考察	108
1.3.1	各内部器官の損傷程度と外見上の観察結果との関係	108
1.3.2	水中圧力波の強さと各内部器官の損傷程度との関係	113
第 1.4 節	結 言	116
第 2 章	魚類の損傷と水中圧力波の受圧方向との関係	117
第 2.1 節	緒 言	117
第 2.2 節	実 験 方 法	117
第 2.3 節	実験結果および考察	120
2.3.1	重態魚の出現率について	120
2.3.2	各内部器官の損傷程度	120
2.3.3	受圧方向と魚の損傷指数との関係	135
第 2.4 節	結 言	136
第 3 章	魚類の損傷と水中圧力波の圧力波形との関係	138
第 3.1 節	緒 言	138
第 3.2 節	実 験 方 法	138
第 3.3 節	実験結果および考察	140
3.3.1	くり返しパルスの影響について	141
3.3.2	パルス幅の影響について	143
第 3.4 節	結 言	155

第 4 章	魚体内の力学的応答と魚類の損傷機構	156
第 4.1 節	緒 言	156
第 4.2 節	実 験 方 法	156
4.2.1	供 試 魚	156
(a)	実 魚	156
(b)	模 型 魚	156
4.2.2	実 験 方 法	157
(a)	概 説	157
(b)	爆 源	158
(c)	測 定 方 法	158
第 4.3 節	実 験 結 果	162
4.3.1	実魚を用いた実験の結果	162
(a)	ハ マ チ	162
(b)	その他の魚種	166
4.3.2	模型魚を用いた実験の結果	169
(a)	腹腔内における圧力測定結果	169
(b)	魚体内における加速度測定結果	171
(c)	腹腔内におけるひずみ測定結果	171
第 4.4 節	実験結果の考察	180
4.4.1	腹腔内における圧力測定結果の考察	180
(a)	実魚を用いた実験	180
(b)	模型魚を用いた実験	186
4.4.2	魚体内における加速度測定結果の考察	188
4.4.3	腹腔内におけるひずみ測定結果の考察	189
第 4.5 節	魚類の損傷機構についての考察	194
第 4.6 節	結 言	200
	結 論	201

第1節 緒 言

近年、「海洋開発」で代表されるように、海に関する問題がいろいろな意味で注目されるようになってきた。これは、人口の増大、産業の発達に伴ない、開発の目が陸上からさらに海に向けられてきたことによるものである。海洋開発の当面の課題としては、大型タンカーに代表されるような大型船の航行に必要な航路の開発および港湾の拡大ならびに陸上交通機関による海上輸送のための海上橋の建設などが考えられており、さらにはまた海底資源の開発や水産に関連する海洋開発も真剣に検討されている。その他、海中公園のような海中観光施設、海上都市、海上空港、海中・海上プラントなどの海洋空間の利用に関連する種々の開発計画も考慮されている。

さて、これらの海洋開発の実施には、多くの解決しておかなければならない技術的諸問題が山積みしているが、効果的でしかも周辺環境への影響をできるだけ少なくする水中爆破技術の開発と確立もその1つにあげることができる。

海外では、すでに水中爆破の大規模な実施例¹⁾がある程度報告されている。しかし、わが国では、今日までに、港湾しゅんせつ²⁾、漁場改善³⁾、⁴⁾のための水中爆破実施例が報告されているのみで、いずれも非常に小規模なものである。とくに、わが国は水産国であるため、水中爆破は漁場環境に悪影響を及ぼすことを理由に、大規模な水中爆破はほとんど実施できない状況にある。

水中爆破が漁業関係に及ぼす影響としては、水中爆破に伴って発生する水中圧力波による魚介類の損傷、水中音による魚類の逃避、岩盤の破壊およびしゅんせつによる漁場環境の変化、爆発生成物および土砂の飛散による漁場環境の汚染などがあげられる。これらの中には従来から研究されているものもあるが、それらの研究はいずれも断片的で、必ずしも充分なものではないため、いずれの問題に対しても科学的な根拠にもとづいた論議が欠けるうらみがある。とくに、水中圧力波による魚介類の損傷の問題は、目視によってある程度被害の程度を容易に見わけることができるために問題になりやすく、水中爆破により生ずる漁場環境の変化について議論される場合、最重要問題として取り上げられている。

そこで、著者は、各種の方法を用いて水中爆破を実施した場合に発生する水中圧力波の性状と、これらの水中圧力波を受けることにより魚類に生ずる損傷の問題について系統的な研究を行ない、得られた結果を本論文にとりまとめた。

第2節 本研究に関連する従来の研究

2.1 水中圧力波の伝播および性状に関連した研究

水中圧力波の伝播に関する研究は、水雷の破壊効果を検討する上で重要な課題であったために、古くから軍事的な目的からの研究が数多く行なわれてきた。これらの研究は19世紀後半

から始っているが、研究の対象はすべて火薬類を水中に吊した状態で爆発させるいわゆる水中爆発により発生する水中圧力波に限られており、本来の水中爆破により生ずる水中圧力波についてはまだほとんど研究されていない。これらの水中爆発に伴う水中圧力波に関する古い研究については山家⁵⁾が総括的に紹介している。

これらの研究の中では、野満の行なった理論的研究⁶⁾が注目される。この研究では、水雷の爆発により生ずる水中圧力波の圧力を直接圧力と間接圧力の2つに分け、これらの圧力と破壊作用の関係について考察している。この場合、直接圧力とはいわゆる水中衝撃波により与えられる圧力のことであり、間接圧力とは爆発による水流が対象物に衝突することにより二次的に生ずる圧力のことである。また、この研究では、水中圧力波の破壊作用はたんにピーク圧のみで論じられるものではなく、インパルスも重要な関係をもつことを指摘し、鏡像の理論を使って海底や海面の影響を考慮したインパルスの理論式を導き、詳しい検討を行っている。

その後水中爆発に伴う水中圧力波に関する研究が飛躍的な発展を遂げたのは第二次大戦中(1941年~1946年)のことである。この時期には、米英日の海軍関係の多くのグループがこぞって水中爆発に関する研究に携わった。残念ながらこの時期にわが国で得られた研究成果は逸散してほとんど残っていないが、米英で得られた研究成果はR.H.Coleによってまとめられ出版されている⁷⁾。この書物には水中爆発の基礎的諸問題についての当時の検討成果が要領よくとりまとめて説明されているが、それらのうちで本研究に関係の深い1, 2の事柄をここに紹介しておく。

まず、火薬類の水中爆発により生ずる水中圧力波はつぎの(2.1)式の関数で示される波形をもつことを指摘している。

$$P = P_m e^{-t/\theta} \quad (2.1)$$

ただし、 θ は薬量と爆源からの距離の関数であり、火薬類としてTNTとペントライトを用いた場合に得られた θ の値が示されている。

また、(2.1)式で示されるような波形をもつ水中圧力波のピーク圧 P_m 、インパルス I およびエネルギー密度 E_f と薬量 W および爆源からの距離 R との関係については、それぞれつぎの(2.2)式で示される関係が得られたことを述べている。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= K \left(\frac{W}{R} \right)^{\frac{1}{3}}{}^\alpha \\ I &= \varrho W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W}{R} \right)^{\frac{1}{3}}{}^\beta \\ E_f &= m W^{\frac{1}{3}} \left(\frac{W}{R} \right)^{\frac{1}{3}}{}^\gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 $K, \ell, m, \alpha, \beta$ および r は爆源に使用した火薬類の種類によって定まる定数である。

このように、第二次大戦中に行なわれた研究によって、当時の技術で測定が可能であった比較的低下の水中圧力波の伝播特性はかなり明らかにすることができた。しかし、爆源近傍に生ずる非常に高圧の水中衝撃波については、その測定が不可能であったので、理論的な検討のみが行なわれたが、爆発生成物や水の高温高圧状態での状態式が確立されていなかったため、理論的な検討は行なわれたものの、必ずしも十分な成果は得られていない。

最近になって、各種の実験技術や測定技術が大いに進歩し、これらを利用して多くの物質の高圧下における特性が求められた。また、電子計算機の発達により、複雑な理論式も数値計算で解かれるようになった。そこで、C. L. Mader⁸⁾ は、このようにして求められた高圧下の物質特性を用い、爆薬の水中爆発により発生する水中衝撃波の特性計算を電子計算機を利用して行なうコードを開発した。さらに、田中ら⁹⁾ は、Maderと同様な手法を用いて、花崗岩中で爆薬を爆発させた場合に発生する衝撃波の特性を求めている。

以上の研究のほかに、爆源から非常に離れた位置での水中圧力波を水中音響としてとらえ、これらを解析することにより、音波の伝播経路上での海洋や海底下の堆積物や岩盤の物理的性質を解明しようという研究も行なわれている。これらのうち、海底下の地質の探査を目的とした基礎的研究としては、水面と水平な海底に挟まれた海中での音波の伝播特性を理論的に検討した C. L. Pekeris¹⁰⁾ の研究や同じ問題をさらに単純化したモデルについて数値計算により検討した I. Papadakis¹¹⁾ の研究をあげることができる。一方、海洋の物理的性質と音波の伝播特性との関係については、海洋の温度分布と音波の伝播経路との関係、伝播経路の形と音波の圧力分布あるいは圧力波形との関係などについての研究成果が発表されている¹²⁾。

以上にその概要を紹介した研究は、先に述べたように、火薬類を水中で爆発させたいわゆる水中爆発により生ずる水中圧力波に関連して行なわれた研究である。これに対し、海底の岩盤内で爆薬を爆発させるいわゆる海底岩の穿孔爆破に伴って発生する水中圧力波に関する詳細な研究はほとんど見られず、わずかに花崎ら¹³⁾ の研究と佐々ら¹⁴⁾ の研究があげられるのみである。前者の研究では、水槽内に設置したモルタルブロック内で3号電気電管を爆発させたとき、モルタル直上方向に伝播する水中圧力波について検討し、この方向に伝播する水中圧力波は音響理論に従って伝播することを明らかにしている。また、後者の研究では、水中爆破に伴う水中圧力波の伝播特性を電子計算機を使ったシミュレーションによって求めている。

その他、水中圧力波の軽減に対して air bubble curtain の効果を検討した研究が見られる。すなわち、J. J. Donoghue¹⁵⁾ は水槽実験によって air bubble curtain の水中圧力波軽減効果を検討し、水中圧力波の圧力、インパルスおよびエネルギー密度などの諸特性が

air bubble によってどのように変化するかを示している。また、E.H.Kennard¹⁶⁾は、air bubble を含む水層を水と空気の間隔的な性質をもった均質な媒質とみなし、平面圧力波が水層から bubble 層に入射する際の透過率や bubble 層を通過する際の圧力の減衰について、理論的な検討を行なっている。若園¹⁷⁾らは、air bubble curtain の水中圧力波軽減効果を魚（スズキ）の損傷の軽減と関連づけている。これらのほかに、さらに、air bubble curtain を利用した水中爆破の実施例も報告されているが^{18),19),20)}、いずれも実施例の紹介が行なわれているのみで、これらの際に発生した水中圧力波そのものについては十分な検討がなされていない。

2.2 水中圧力波が魚介類に及ぼす影響に関連した研究

水中圧力波が魚介類に及ぼす影響には、水中圧力波のもつ強力な圧力による魚介類の損傷の問題および水中音により魚群の行動に異常性が生ずる問題があげられる。そこで、ここではこれらのそれぞれの問題ごとに従来行なわれてきた研究の概要を述べる。

水中圧力波による魚介類の損傷に関する研究は、最初は末広²¹⁾が指摘しているように、水中爆発を利用して魚類を捕獲する方法を開発することを目的として行なわれていた。しかし、現在は爆発物を使って魚類を捕獲することは禁止されているので、この種の研究はその後進展していない。

稲村²²⁾は、ダイナマイトの水中爆発により発生した水中圧力波を受けたウナギおよびアブラザメの聴覚器官および内臓器官の損傷を詳細に観察した。この研究の特徴は、上記器官の損傷を解剖学的に詳細に観察している点にある。

第二次世界大戦の前後にわたって、Chesapeake Biological Laboratory の調査班は、マス、シマスズキなど 5 種類の魚とカキおよびカニが水中圧力波を受けた場合の損傷について外見上の観察により調べるとともに、簡易圧力計の一種である crusher gauge を用いて水中圧力波の圧力値の測定もあわせて行ない、圧力値と魚類の損傷との関係について検討している²³⁾。その後、わが国やアメリカにおいてこの種の研究がかなり見られ、成果が報告されているが^{24)~31)}、これらの研究はいずれも断片的なもので、水中圧力波による魚類の損傷について、その機構までを解明した本質的な研究は今のところ見あたらない。

次に、水中音により生ずる魚群の行動の異常性に関しては、実験技術が難しいこともあり、これに関する研究はきわめて少ない。

末広らは、かつて大規模な実験を行なって、砲声に魚に及ぼす影響を検討した³²⁾。この研究では、まず砲音の分析結果をもとにして擬砲音を作り、この擬砲音をカタクタイワシに聞かせたところ、この音に対して反応を示したことを報告している。また、武富ら³³⁾は、アジ群とサバ群に純音を加え、音の周波数と魚の反応との関係について検討した。その結果、アジ群は

300Hz 付近の音にもっとも強い反応を示し、サバ群は 500Hz ~ 1,050Hz の範囲の音に強い反応を示すことが明らかにされた。

第3節 本研究の目的と内容

水中爆破による魚類の損傷の問題を考える場合には、まず水中爆破に伴う水中圧力波の特性について明らかにしておく必要がある。第2節に述べたように、従来の研究では、火薬類を水中で宙吊り状態で爆発させる、いわゆる水中爆発に関しては今日までにすでに数多くの研究が行なわれており、これらの際に発生する水中圧力波についても基本的な事項はかなり十分に体系づけられている。しかし、この水中爆発に伴う水中圧力波に関しても、従来の研究のほとんどがいわゆる軍用の高性能爆薬を対象に行なわれており、産業用に用いられている火薬類の水中爆発に伴う水中圧力波の特性についての研究は少ない。さらにまた、水底岩盤中に装薬して爆破する、いわゆる水中せん孔爆破に伴って発生する水中圧力波については、今日までに系統的な研究がほとんど見られない。

一方、水中圧力波による魚類の損傷についても、従来の研究はそのほとんどが生ずる損傷と水中圧力波の特定の特性との関係を断片的に扱ったものが多く、水中圧力波の諸特性と魚類の損傷との関係を系統的に追究した研究は少ない上に、損傷機構については今なお明らかにされているとはいえない現状である。

そこで、著者は、上記のような事情を考慮し、産業用の火薬類を用いて行なわれる各種の爆破、すなわち水中爆発および水中せん孔爆破に伴って発生する水中圧力波の性状をより明確にし、さらにこのような水中圧力波が魚類に加えられたときに生ずる魚類の損傷と水中圧力波の諸特性との関係および水中圧力波による魚類の損傷機構を明らかにすることを目的として本研究を行なった。

これらの研究をとりまとめた本論文は、以下の内容によって構成されている。

緒論では、著者が本研究を行なうに至った動機と目的を述べたほか、本研究に関連する従来の研究についてそれらの概要を紹介した。

第1篇では、水中で火薬類を種々な方法で爆発させた場合に発生する水中圧力波の性状について検討した結果をとりまとめた。その第1章は、水中爆発に伴う水中圧力波の性状を、爆源として電気雷管のみを用いた場合と、火薬および爆薬を爆源として用いた場合とに分けて検討した結果を述べた。なお、本研究のために行なったすべての実験においては、常に水中圧力波の計測を行なったので、第1章の冒頭に本研究において用いた水中圧力波の測定方法について述べ、計測上留意すべき問題点とそれらに対する対策を明らかにしておいた。第2章では、無自由面の水中せん孔爆破を行なった際に発生する水中圧力波の性状についての検討結果を、また、第3章では一自由面の水中せん孔爆破を行なった場合に発生する水中圧力波の性状について検討した結果

を述べ、さらに、第4章において、実際に海底岩盤を対象にして実施された大規模な水中せん孔爆破実験の際に測定した水中圧力波の性状について解析した結果を述べたのち、さらにこれらの結果が先に第2章および第3章で示した小規模な水槽実験により得られた結果とも矛盾していないことを指摘した。

第2篇では、水中圧力波が魚類に及ぼす影響のうちとくに重要と考えられる水中圧力波による魚類の損傷に関する研究成果をとりまとめた。

すなわち、まず第1章では、水槽実験により得られた結果を整理し、水中圧力波によって魚類の内臓諸器官のうちのどの器官がもっとも損傷を受けやすいか、また、同じ強さの水中圧力波を受けた場合でも、魚種によって生ずる損傷にどの程度の差があるかについて検討した結果を述べた。次いで第2章では、水中圧力波の受圧方向が魚類の損傷に及ぼす影響について研究した結果を述べ、さらに第3章には、水中圧力波の圧力波形から求められる水中圧力波の諸特性、いいかえれば圧力最高値、インパルス及びエネルギー密度と魚類の損傷との関係について検討した結果を述べ、これらの諸特性のうちどの特性が魚類の損傷ともっとも相関関係をもつかを明らかにした。最後に、第4章では、魚体内の力学的応答と魚類の損傷との関係について実魚および模形魚を用いて検討した結果と、さらにこれらの検討結果にもとづいて水中圧力波による魚類の損傷機構について考察した結果を述べた。

結論においては、本論文の各篇各章で得られた結果を総括し、その要点を抜萃して示した。

参 考 文 献

1) たとえば

C.L.Brown Jr. and R.H.Smith:NUSC Technical Report,4459(1972)
F.C.Swansbourne Jr.:World Dredging & Marine Construction, 7-8,
P. 28(1971)

2) 中野雅司, 田中則雄, 酒井洋:工業火薬協会誌, 33-3, P.134(1972)

3) 国立真珠研究所, 京都大学資源工学教室(若園, 小川, 中野, 沢田, 阪口):国立真珠研究所報告, 12, P.1455(1967)

4) 若園吉一, 中野雅司, 小川輝繁, 沢田保夫, 谷口宮三郎:工業火薬協会誌, 32-4,
P.182(1971)

5) 山家信次:工業火薬協会誌, 13-3, P.35(1952)

6) 野満隆治:火兵学会誌, 12-1, P.1(1918)

7) R.H.Cole :Underwater Explosion, Princeton University Press(1948)

8) C.L.Mader:Los Alamos Sci.Rep., LA4594(1970)

- 9) 田中克己, 疋田強: 工業火薬協会誌, 34-4, P.213(1973)
- 10) C.L.Pekeris: The Geol.Soc.Am., MEMOIR, 27(1948)
- 11) I.Papadakis: NATO Saclant ASW Research Centre,
Technical Report, No.187(1971)
- 12) たとえば
R.M.Brash and J.A.Goertner: NOLTR, 71-213(1971)
J.F.Goertner: NOLTR, 72-90(1972)
- 13) 花崎紘一, 伊藤一郎: 工業火薬協会誌, 33-3, P.125(1972)
- 14) 佐々宏一, 伊藤一郎, 長坂進: 工業火薬協会誌, 38-3, P.137(1977)
- 15) J.J.Donoghue: TMB Report, R-177(1944)
- 16) E.H.Kennard: TMB Report, 517(1943)
- 17) 若園吉一, 小川輝繁, 沢田保夫, 阪口清次: 工業火薬協会誌, 31-2,
P.81(1970)
- 18) R.C.Jacobs^{sen}: Ontario Hydro Research News, 6(1954)
- 19) R.C.Jacobs^{sen}: The Hydro Electric Power Commision of Ontario,
Research Division Report, No.54-166(1954)
- 20) M.Graves: Civil Engineering - ASCE, 38-6, P.59(1968)
- 21) 末広恭雄: 水中発破による影響の調査(その2)報告書, 本州四国連絡橋公団, 安全工学協
会, P.2071(1974)
- 22) 稻村兵助: 東北医学, 31-3, P.227~237 および P.449~468(1942)
- 23) Chesapeake Biological Laboratory: Chesapeake Biological Lab., Pub.
No.70(1948)
- 24) J.A.Aplin: Calif. Fish and Game, 33-1, P.23(1947)
- 25) C.L.Hubbs and A.B.Rechnitzer: Calif. Fish and Game, 33-1,
P.332(1952)
- 26) 小山武夫: 東海区水産研究所報告, 8, P.23(1954)
- 27) 黒木敏郎, 九万田一己: 北大水産彙報, 12-1, P.16(1961)
- 28) 長崎県水産試験場: 長崎水試登録第268号(1967)
- 29) 鹿児島県水産試験場: 昭和34年度鹿児島県水産試験場事業報告, P.280(1959)
- 30) C.L.Brown Jr. and R.H.Smith: NUSC Technical Report, 4459(1972)
- 31) W.C.Day et al: U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station
Technical Report, E-72-23(1972)

-
- 32) 末広恭雄他：魚群に及ぼす砲声の影響に関する研究，農林畜水産業関係応用科学研究費等による協同研究報告書（1957）
- 33) 武富一，三次信輔：東海区水産研究所報告， 67， P.99（1971）

第 1 篇 火薬類の爆発にもとづく水中圧力波の性状に関する研究

第 1 章 水中爆発に伴なう水中圧力波

第 1.1 節 緒 言

水中圧力波の伝播特性を基礎的に検討するためには、まず、もっとも単純なケースとして、無限の水中で爆発が起こった時に生ずる水中圧力波の伝播性状について検討しておくことが必要であろう。そこで、本章に述べた研究では、電気雷管、爆薬および火薬がそれぞれ水中で爆発した時に生ずる水中圧力波を測定し、火薬類の種類、薬量、形状などが水中圧力波の特性に及ぼす影響について検討するとともに、爆源からの距離と水中圧力波の性状との関係を求めた。それらの研究結果について以下に述べることにする。

第 1.2 節 水中圧力波の測定装置

爆薬が水中で爆発した場合に生ずる水中圧力波の圧力-時間曲線については、従来より理論的にも実験的にもかなり多くの研究が行われてきている¹⁾。それらの結果によれば、最初に伝播する強い圧力波は Fig. 1.1 に示すような波形を示すことが知られている。このような圧力波形は次式によって表わすことができる。

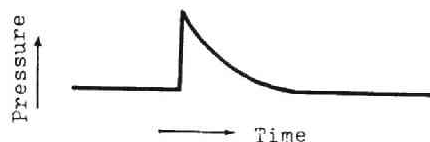


Fig.1.1 Typical underwater pressure wave form due to underwater explosion.

$$P = P_m e^{-t/\theta} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここに、 P : 時間 t における圧力

P_m : 圧力最高値で、圧力波が到達した瞬間 ($t = 0$) にこの最高値を示すことが多い。

t : 圧力波の到達後の経過時間

θ : 定数

さて、上記のような波形を示す水中圧力波の波形の測定は、今日までに種々の方法で行なわれてきているが、これらを整理すると、機械的測圧器（クラッシュ・ゲージ、ダイアフラム・ゲージ、ピストン・ゲージ等）と、電気的測圧器（圧電気型圧力計、ひずみゲージ型圧力計、圧抵抗型圧力計等）に分類することができる。

機械的測圧器は、外力により永久変形を生ずる材料、たとえば銅、鉛などで作った板、円柱、球などを受圧材として、それらの変形量から圧力を求める方式のものである。このような機械的

測圧器は、構造が簡単で、安価であり、かつ取り扱いが容易であるから、手軽に使用できる。しかし、本節の冒頭で述べたように、水中圧力波の圧力は時間とともに動的圧力であるが、機械的測圧器がこのような動的圧力を受けた場合の変形量は、その値のみに依存するのではなく、圧力波形の影響も受ける。そこで、信頼できる測定値を得るためには、測定の対象となる爆発による衝撃と同一の衝撃を加え、測圧器の較正を行なう必要がある。また、機械的測圧器によれば、圧力の時間的な変化状態を求めることができないので、圧力波の性状を詳しく知ることができない。

一方、圧力の大きさを電気的な諸量に変換し、これを然るべき過渡現象計測用の計測器によって測定する方法を選べば、圧力の最高値のみならずその時間的な変化状態をも知ることができる。このように、圧力を電気的な諸量に変換して計測できる圧力計を電気的測圧器と呼んでいる。このような圧力計を用いて水中圧力波を計測すれば、その結果から解析に有効な数多くの情報を得ることができる。そこで、著者は本研究を通じて、圧力の計測はすべて電気的測圧器によることとした。

1.2.1 受圧素子

電気的測圧器の受圧素子としては、一般に圧力-電気変換素子と圧力-抵抗変換素子のいずれかが用いられているが、本研究においては圧力-電気変換素子を用いて計測した。

ここで、圧力-電気変換素子の原理を簡単に説明しておく。一般に、結晶体内に応力が作用すると電気的分極を生ずるが、その際応力と電気的分極の間にはつきに示すような関係があることが知られている²⁾。

$$\left. \begin{aligned} -P_1 &= d_{11}X_x + d_{12}Y_y + d_{13}Z_z + d_{14}Y_z + d_{15}Z_x + d_{16}X_y \\ -P_2 &= d_{21}X_x + d_{22}Y_y + d_{23}Z_z + d_{24}Y_z + d_{25}Z_x + d_{26}X_y \\ -P_3 &= d_{31}X_x + d_{32}Y_y + d_{33}Z_z + d_{34}Y_z + d_{35}Z_x + d_{36}X_y \end{aligned} \right\} \dots\dots (2.2)$$

ここに、 P_1, P_2, P_3 はそれぞれ x, y, z 軸方向の電気的分極であり、 x, y, z 軸に垂直な面に発生する電荷密度と考えてよい。 X_x, Y_y, Z_z はそれぞれ x, y, z 軸方向の法線応力であり、 Y_z, Z_x, X_y はそれぞれの軸に垂直な面内での接線応力である。また、(2.2)式に含まれる d_{ij} は圧電率と呼ばれている係数で、18個あるが、これらはすべてが有効なものではなく、どのような圧電材料であっても数個を残して他は零の値になる。このように、結晶体に応力が作用することによって電気的分極を生ずる性質を圧電効果と呼んでいる。

さて、圧力-電気変換素子は、この圧電効果の強い物質(圧電体)からできている。現在、この目的に利用されている物質は単結晶と等方磁器に分類され、前者としては水晶、ロッシェル塩、ADP (Ammonium Dihydrogen Phosphate)、KDP (Potassium Dihydrogen

Phosphate), EDT (Ethylene Diamine Tartrate), LH (Lithium Sulfate Monohydrate), 電気石などがあり, 後者としてはチタン酸バリウム, チルコン酸鉛, ニオブ酸鉛などがある。これらのうち, 本研究における圧力測定に使用した圧電体はチタン酸バリウム磁器ならびに電気石である。これらの圧電体の特性値を Table 1.1 に示しておく。

Table 1.1 Properties of piezoelectric elements used in this study.

Piezoelectric element	Density ³⁾ (g/cm ³)	Young's ⁴⁾ modulus (Newton/m ²)	Piezoelectric ⁴⁾ constant (Coulombs/Newton)	Dielectric ⁴⁾ constant (F/m)	Maximum safety ³⁾ stress (kg/cm ²)
Barium titanate ceramics	5.7	1.18×10^{11}	$d_{31} = 5.6 \times 10^{-11}$ $d_{33} = (13 \sim 16) \times 10^{-11}$	1250×10^{-11}	800
Tourmaline (Hydrostatic type)	3.1	1.64×10^{11}	$d_{31} + d_{33} = 2.16 \times 10^{-11}$	6.65×10^{-11}	7000

つぎに, 受圧素子の構造について説明する。Fig. 1.2 はチタン酸バリウム磁器を圧電体として使用している受圧素子の構造を示したものである。チタン酸バリウム磁器は村田製作所製のもので, 直径が 8 mm, 厚

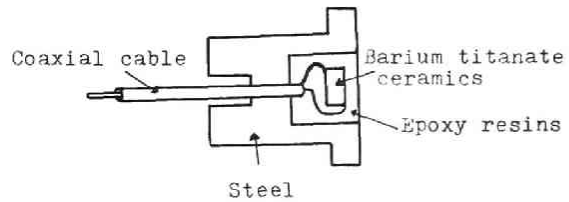


Fig.1.2 Barium titanate ceramics pressure gauge.

さが 3 mm の円板状に成形されており, その両端面には銀メッキを施し, さらにその上に厚さが 0.5 mm のステンレス製の電極が取り付けられている。そして, Fig. 1.2 に示すようにこれを鋼製容器に入れ, 残りの空間部はエポキシ樹脂で満たされている。一方, 電気石圧力計の構造は Fig. 1.3 に示すとおりである。すなわち, 厚さ 0.7 mm の円板状の電気石結晶の両面に電極をつけ, それらを 4 枚重ねて貼り合わせ, その周囲は硬化ゴムで覆われている。この圧力計はもとアメリカの Underwater Explosives Research Laboratory によって開発されたものであるが⁵⁾, 本研究には Crystal Research 社によって製作されたものを使用した。この圧力計に使用さ

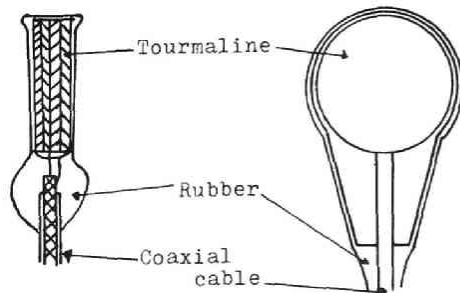


Fig.1.3 Tourmaline pressure gauge.

れている電気石はHydrostatic type であり、水中圧力のように3軸方向に加わる圧力に比例した分極が2軸方向に現われるため、受圧面を一軸方向に固定する必要はない。その他、電気石はヒステリシスや疲労による感度の変化がなく、また最高安全応力が非常に高いなど、水中圧力波の測定に適した特徴を持っている。

1.2.2 測定系の構成

Fig. 1.4 は、上記のような圧力計を用いて測定を行なう場合の圧力測定回路の概念を示したものである。すなわち、受圧素子に圧力が加わると、圧電体の両極には圧力 P に比例して $Q = KAP$ （ただし、 KA は比例定数）という大きさの電気量 Q が発生する。一方、圧電体の両極に

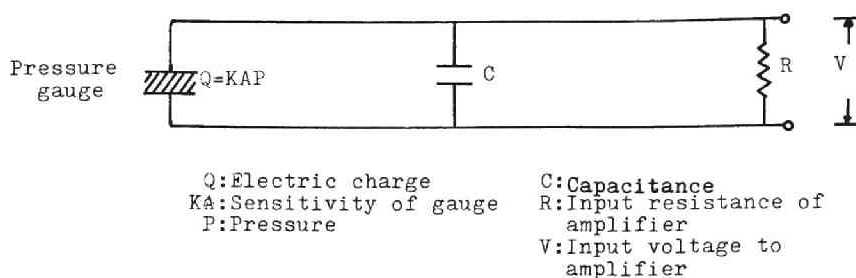


Fig.1.4 Circuit for pressure measurement.

並列にかかる電気容量を C とすると、増幅器の入力には $V = Q/C$ の関係で与えられる電圧 V が加わる。そこで、 KA と C が既知ならば、オシロスコープで電圧 V の値を測定することにより、圧力 P を求めることができる。

1.2.3 較正方法

電気的測圧器を用いて圧力を測定する場合の較正は、受圧素子について行なう較正と測定回路について行なう較正の両者が必要である。すなわち、受圧素子について行なう較正はその感度 KA を求めることであり、測定回路について行なう較正は、圧力計に発生した電荷量 Q とオシロスコープの読み D との関係を求めることである。

まず、チタン酸バリウム磁器圧力計の感度は、水槽内で発生させた既知の圧力をもつ圧力波を受感して得られる電気量を測定することによって求めた。既知の圧力波としては、水中での平底電気雷管の爆発に伴う水中圧力波の圧力最高値と爆源からの距離との関係が従来の実験によって得られているので、これを利用することにした。一方、電気石圧力計の感度はメーカーである Crystal Research 社によって求められているので、その値をこの圧力計の感度として利用した。Crystal Research 社で実施している電気石圧力計の感度較正法は、圧力計にあらかじめ油圧によって圧力を加えておき、急激にその圧力を解放することによって発生する電荷量をクーロン・メータによって測定するという方法である。

さて、測定系の校正には Fig. 1.5 に示す校正回路を用いた。図において、 C_0 は圧力計の

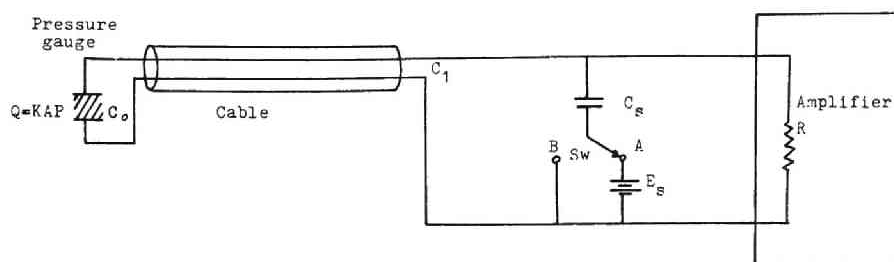


Fig.1.5 Calibration circuit

電気容量、 C_1 は伝送ケーブルの分布容量、 C_S は標準コンデンサの電気容量、 E_S は基準電圧、 R は増幅器の入力インピーダンスを示す。スイッチ S_W を B 側に入れた場合には、回路は測定時の状態に対応することになる。この場合、圧力計の感度 KA ($\mu\mu C/Kg/cm^2$)、水中圧力波の圧力を P (Kg/cm^2)、発生電荷を Q ($\mu\mu C$)、増幅器の入力電圧を E (V)、オシロスコープの読みを D とすると、(1.3) 式および (1.4) 式が成り立つ。

$$Q = KAP \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

$$\begin{aligned} \kappa D = E &= Q / (C_0 + C_1 + C_S) \\ &= KAP / (C_0 + C_1 + C_S) \quad \dots\dots\dots (1.4) \end{aligned}$$

ここに、 κ ：増幅器の入力電圧とオシロスコープの読みとの比

つぎに、校正にあたっては、スイッチ S_W を B から A に入れかえると、オシロスコープ上には Fig. 1.6 に Q ステップとして示したような波形が得られる。この際の増幅器の入力に加わる電圧を E_C (V) とし、オシロスコープの読みを D_C とすると、次式が成り立つ。

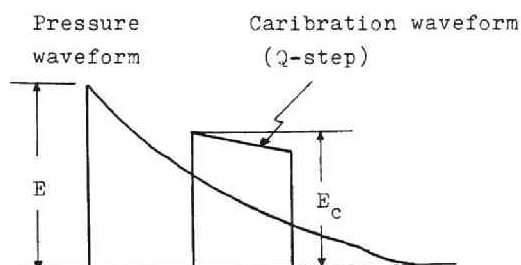


Fig.1.6 Caribration waveform.

$$\kappa D_C = E_C = C_S E_S / (C_0 + C_1 + C_S) \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

(1.4) 式と (1.5) 式から次式が得られる。

$$\begin{aligned} P &= \frac{C_S E_S}{KA} \cdot \frac{E}{E_C} \\ &= \frac{C_S E_S}{KA} \cdot \frac{D}{D_C} \quad \dots\dots\dots (1.6) \end{aligned}$$

したがって、 E_S 、 C_S 、 KA および D_C をあらかじめ求めておけば、 D を測定することによって圧力 P を求めることができる。

1.2.4 本測定法において留意すべき点

(a) 高域周波数応答性

時間的に変化する現象をひずみなく忠実に測定するためには、測定系の周波数応答性が現象の周波数成分に対して充分なものでなければならない。そこで、まず、高域周波数応答性について検討してみる。圧電型の受圧素子の周波数応答性は一般に Fig. 1.7 に示すようになる。すな

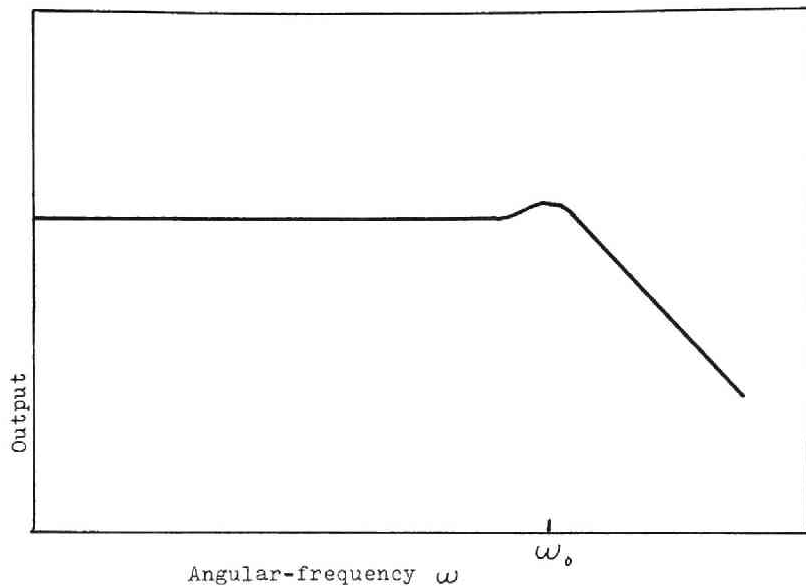


Fig.1.7 Frequency response curve of piezoelectric transducer.

わち、利得は角周波数 ω の小さいところでは一定であるが、固有振動の角周波数 ω_0 を越えると急激に低下する。そして ω_0 付近では局部的に利得が大きくなるところがある。このように、圧電型の受圧素子は、固有振動の周波数付近およびそれ以上の周波数をもつ波に対しては充分な応答を示さない。本研究での圧力測定に用いた受圧素子の共振周波数は、チタン酸バリウム磁器では約 370 KHz、電気石ゲージでは 1,080 KHz ~ 1,800 KHz であるので、これ以上の周波数をもつ波の測定には不適である。

つぎに、受圧素子の形と波長との関係を検討しておく必要がある。たとえば、今回の実験において著者が使用したような円板状受圧素子が、Fig. 1.8 に示すように、円板の軸を圧力波の進行方向に直角な方向に向けて設置してあるとしてみよう。この場合、圧力波の波長が受圧素子の半径にくらべてはるかに大きい場合には問題はないが、そうでない場合には応答性が悪くなる。

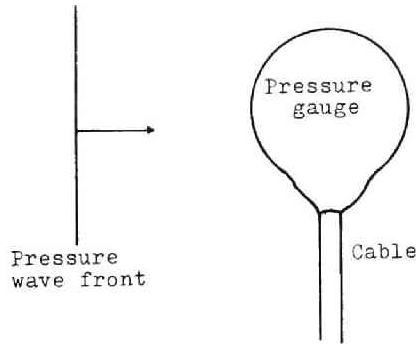


Fig.1.8

たとえば，圧力波が(1.7)式で示されるような鋸歯状の波形をもつものと仮定しよう。

$$P(x, t) = \begin{cases} 0 & (t < x/c \text{ のとき}) \\ p_0 \left[1 - (1/\theta') (t - x/c) \right] & (t \geq x/c \text{ のとき}) \end{cases} \quad \text{..... (1.7)}$$

ここに， p_0 : 圧力最高値

θ' : 波の波長と相関性のある定数

x : 波面の進行方向の座標

t : 時間 ($x=0$ に波面に到達した時を $t=0$ とする。)

c : 波の伝播速度

この場合には，円形をなす圧力計の応答関数 $S(t)$ は，(1.8)式に示す形で表わすことができる。

$$S(t) = \begin{cases} 0, & (t < -a/c \text{ のとき}) \\ \phi/\pi - (\sin\phi \cos\phi)/\pi \\ - (a/3\pi c\theta') (3\sin\phi - 3\phi \cos\phi - \sin^3\phi), & (-a/c < t < a/c \text{ のとき}) \\ 1 - t/\theta', & (t > a/c \text{ のとき}) \end{cases} \quad \text{..... (1.8)}$$

ここに， a : 圧力計の半径

$$\phi = \cos^{-1}(ct/a)$$

時間 t は圧力計の中心に波面が到達した時を 0 としている。

$S(t)$ と t/θ' の関係を， $a/c\theta'$ の値をパラメータにして図示すると Fig. 1.9 に示すとおりになる。Fig. 1.9 に明らかなように， $a/c\theta'$ が小さい場合には応答性は良いが，

$a/c\theta'$ が大きくなると、圧力計に加わる圧力が一様ではなくなり、それらの平均値として応答するようになる。したがって、応答性は悪くなり、 $a/c\theta'$ が $1/2$ の場合には $S(t)$ のピー

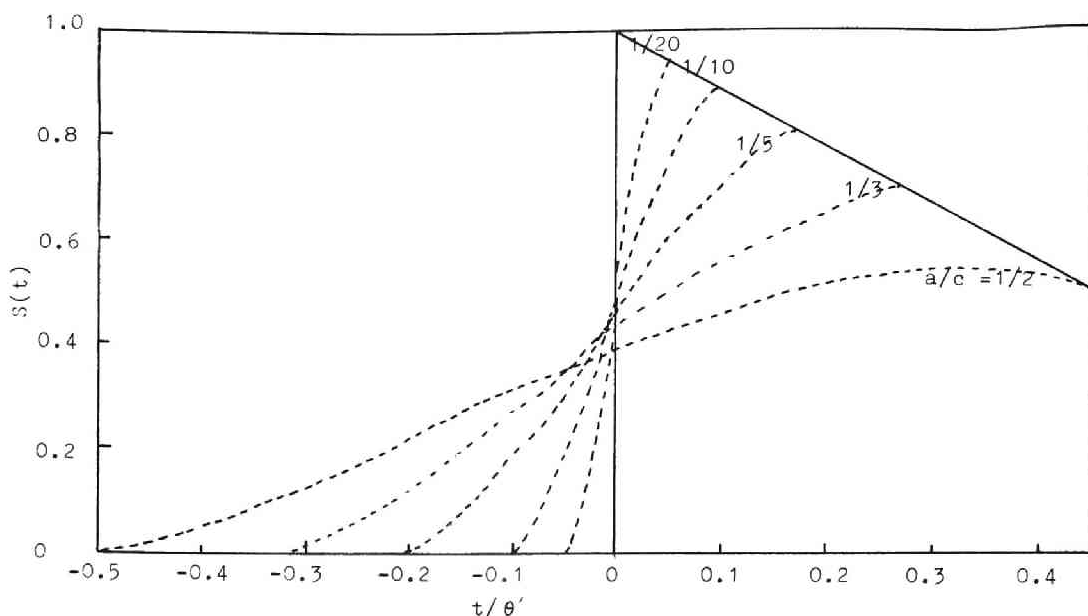


Fig.1.9 Relation between $S(t)$ and t/θ'

ク値は P のその約 $1/2$ に低下することがわかる。そのため、圧力計としては、測定すべき圧力波長に対してその大きさが充分小さいものを使用しなければならない。

さて、爆薬の水中爆発に伴う水中圧力波の波形は、一般に (1.1) 式で示すことができるが、この波形を鋸歯状の波形に近似して考える場合には、 θ' のかわりに θ を用いても大きな間違いはない。今回著者が行った水中圧力波の測定で、もっとも短い波長の圧力波を発生する可能性があるのは雷管衝撃の場合である。この場合の θ の値はほぼ $30 \sim 40 \mu\text{s}$ となる。そこで、圧力波の伝播速度が $1,500 \text{ m/s}$ とすると、 $c\theta$ の値は約 $5 \sim 6 \text{ cm}$ となる。したがって、圧力計としては半径 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 以下のものを使用しなければならないことになる。また、今回、著者が使用した圧力計の受圧素子は直径にくらべて厚みが薄いので、素子の円板面が圧力波の進行方向に直角になるようにすれば応答性がよくなる。

以上に、受圧素子の高域周波数応答性について述べたが、増幅器類や記録計などの応答性についても注意しなければならない。本研究で使用したシンクロスコープの周波数帯域幅は $\text{DC} \sim 5 \text{ MHz}$ 、あるいはそれ以上のものである。また、インピーダンス変換増幅器の周波数帯域幅は $\text{DC} \sim 250 \text{ KHz}$ である。一方、水中圧力波の場合には、高域周波数特性が 200 KHz 以上の測定器によって充分測定できると考えられるので、使用した増幅器や記録計についての周波数応答

性については問題はないものとする。

(b) 低域周波数応答性

圧電型の受圧素子を使って測定する場合、とくに注意しなければならないことは低域周波数応答性の問題で、このことをFig. 1.10によって説明する。Fig. 1.10は圧電体を使った

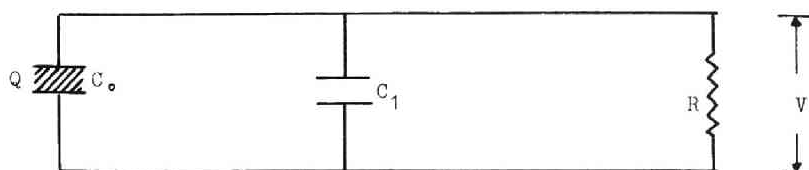


Fig.1.10 Basic circuit of measurement system using piezoelectric gauge.

測定系の基本回路を示したものである。ここで、 Q は発生電荷、 C_0 は圧電体の静電容量、 C_1 はケーブルの分布容量等の圧電体に並列にかかる静電容量の和、 R は電圧測定器あるいは増幅器の入力インピーダンスの値を示す。このような回路を用いて正確な測定を行なうためには、圧電体の両極間は電氣的に完全に絶縁されていなければならない。もし絶縁が不完全であれば、発生電荷 Q は時間とともに放電し、圧力が圧電体に加わっていても R の両極に生ずる電圧は零というようなことが起こる。しかしながら、実際には圧電体の両極間を完全な絶縁状態にして測定することは不可能に近い。なぜならば入力インピーダンスを無限大にすることはできないし、たとえそれが可能であっても静電気の漏洩を完全に防止することは不可能と考えられるからである。

ところが幸いことに、水中圧力波は時間的に変化する過渡現象であり、かつわれわれの測定もこのような圧力の時間的な変化状態を知ろうとするのが目的である。そこで、圧電体に帯電する電荷の放電時間が、圧力の変化時間にくらべてはるかに大きければ、實際上電荷の放電は問題にならない。たとえば、圧力波形が(1.1)式で示したように、 $P = P_m e^{-t/\theta}$ の形で表わされるものと仮定すると、Fig. 1.10に示した回路において、 R の両端に加わる電圧 V の時間的变化は(1.9)式で表わされる。

$$V = V_0 e^{-t/\theta} - V_0 \left(\frac{\theta}{RC - \theta} \right) (e^{-t/RC} - e^{-t/\theta}) \quad \dots\dots\dots (1.9)$$

ここに、 $C = C_0 + C_1$

$V_0 = KAP_m / C$ (KA は圧電素子の感度)

したがって、 $RC \gg \theta$ であれば $V = V_0 e^{-t/\theta}$ となり、電荷は圧力波形と同一の応答を示すことになる。いいかえれば、回路の時定数 RC の値を圧力波の時定数にくらべてはるかに大きくなるように選んでおけばよいことになる。

つぎに、圧力波のインパルスを求める場合に時定数がどのように影響するかについて検討しておく。(1.1)式で示される圧力波形については、インパルス I_0 は(1.10)式によって求められる。

$$I_0 = \int_0^{\infty} P dt = P_m \theta \quad \dots\dots\dots (1.10)$$

ところが、Fig. 1.10 に示した回路を用いて計測された波形から得られる見かけのインパルス I_{ms} は(1.11)式に示すようになる。

$$\begin{aligned} I_{ms} &= \int_0^T P_m \left\{ e^{-t/\theta} - \left(\frac{\theta}{RC - \theta} \right) (e^{-t/RC} - e^{-t/\theta}) \right\} dt \\ &= \left[\frac{P_m \theta}{1 - \theta/RC} (e^{-t/RC} - e^{-t/\theta}) \right]_0^T \quad \dots\dots\dots (1.11) \end{aligned}$$

さて、(1.9)式によって与えられる測定波形はFig. 1.11 に示すようになるが、積分時間 T を図のように V が減衰して零になるまでの時間とすると、(1.11)式の I_{ms} の値は(1.12)式に示すようになる。

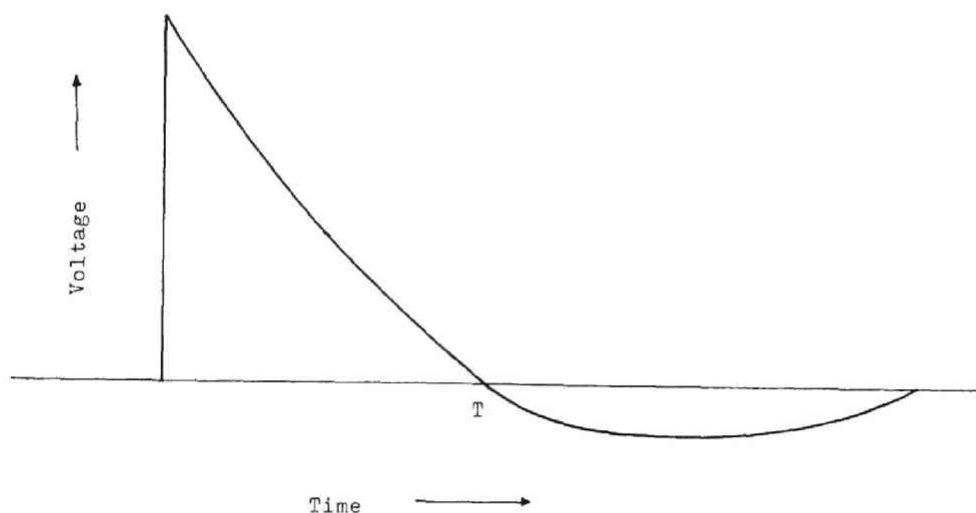


Fig.1.11

$$I_{ms} = \frac{M I_0}{M - 1} \left\{ M \frac{1}{1 - M} - M \frac{M}{1 - M} \right\} \quad \dots\dots\dots (1.12)$$

ここに、 $M = RC/\theta$

(1.12)式を用いて、求められるインパルスにおいて生じうる誤差 $(I_0 - I_{ms})/I_0 = \epsilon$ と RC/θ との関係を図示すると、Fig. 1.12 に示すとおりになる。したがって、 ϵ を2%以下にするには、 RC/θ の値がほぼ300以上になるようにしなければならない。そのためには、

コンデンサーを並列に挿入して静電容量 C の値を大きくするか、あるいは入力インピーダンス R の値を大きくするか、いずれの方法によらなければならない。しかし、 C 値の選択には SN 比からの制限もうけるので、一般には R 値を大きくする方法

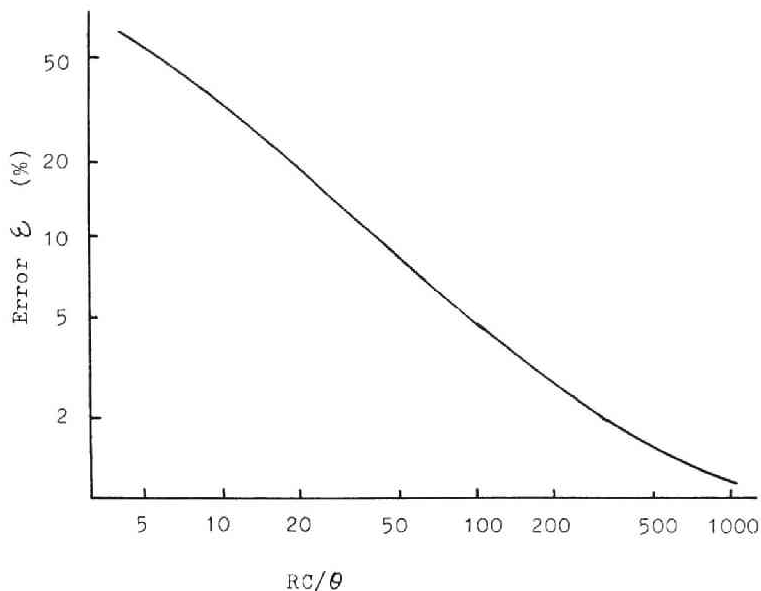
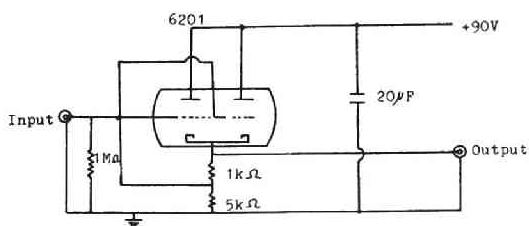
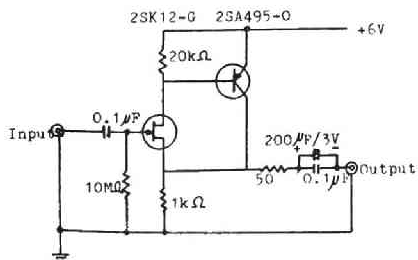


Fig.1.12 Relation between ε and RC/θ

を選ぶのが实际的である。これらのことを考慮して、本研究においては使用するシンクロスコープの増幅器の入力インピーダンスの値を $1\text{ M}\Omega$ としたが、これで不十分な場合は、カソードフォロワーやエミッタフォロワー回路のインピーダンス変換増幅器を用いて、入力インピーダンスを大きくするように心掛けた。なお、本研究に使用したインピーダンス変換増幅器の回路図は Fig. 1.13 に示すとおりである。



a) Cathod follower circuit



b) Emitter follower circuit

Fig.1.13 Impedance converter circuit.

(C) ケーブルのターミネーション

長いケーブルを用いて信号の伝送を行なう場合には、電線端からの反射波の影響を防ぐために、使用する電線の特性インピーダンス $R_0 (= \sqrt{L/C})$ でターミネートしなければならない (Fig. 1.14)。ここに L , C は、それぞれケーブルの単位長あたりに分布しているインダクタンスおよびキャパシタンスである。本研究において用いた同軸ケーブルの特性インピーダンスは 75Ω であるが、圧電型の圧力計を用いて測定する場合にこのように小さなインピーダンスでターミ

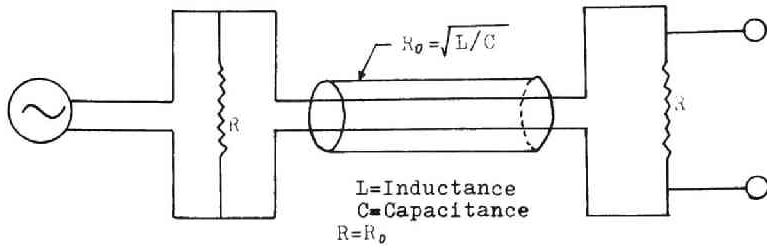


Fig.1.14 Cable termination network.

ネートすると、(b)項で述べた低域周波数応答性を得るための条件に反することになる。そのため、本研究では、(b)項で説明したインピーダンス変換増幅器を途中に置き、受圧素子とインピーダンス変換増幅器の間のケーブルはできるだけ短くなるようにし、インピーダンス変換増幅器からシンクロスコープまでの間のケーブルの両端をターミネートする方法を用いた (Fig. 1.15)。このようにすれば、ターミネートされていないケーブルは短かいので、実際に反射

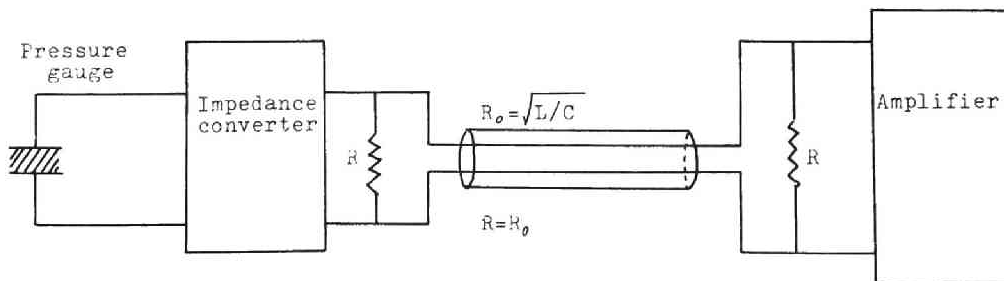


Fig.1.15 Cable termination network on measurement system used in this study (1)

波の影響を防ぐことができる。また、実験場所の条件で、受圧素子からあまり離れない位置にインピーダンス変換増幅器を設置することが困難な場合は、Fig. 1.16 に示すような方法でターミネートし、反射を防止するようにした。この際抵抗 R およびコンデンサー C については、擬似衝撃波発生装置からの信号により反射が生じないように、それぞれの値を実験的に決定した。

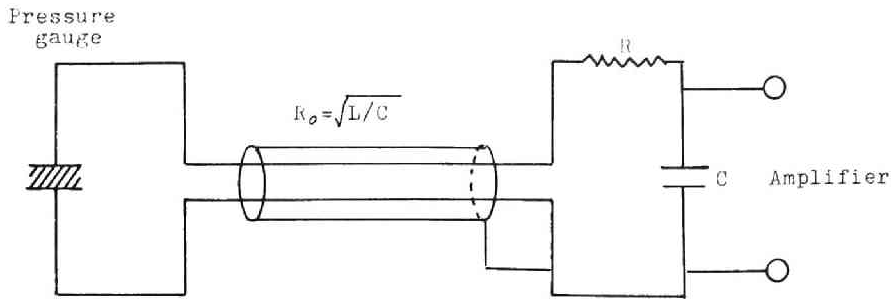


Fig.1.16 Cable termination network on measurement system used in this study (2).

(d) ケーブルシグナル

普通のケーブルに強い圧力を加えると静電荷が発生し、ケーブルシグナルと呼ばれている大きなノイズが生ずる。本研究におけるように、水中爆発あるいは水中爆破により生ずる水中圧力波を測定しようとする場合には、爆心の近くのケーブルは非常に強い圧力を受けるため、このようなケーブルシグナルが生じないように配慮しなければならない。そこで本研究では、とくにケーブルシグナルを小さくするように設計されたアンチマイクロホニックケーブル（Crystal Research 社製）を使ってケーブルシグナルの影響を防止するようにした。

第1.3節 雷管衝撃に伴う水中圧力波の特性

1.3.1 実験装置および方法

本節では、爆源に電気雷管を使用して測定した水中圧力波の特性について述べる。

実験は、直径 1.8 m、高さ 1.8 m の鋼製水槽を使用して行なった。Fig. 1.17 は爆源および圧力計の配置を示したものである。水槽内の水深は 1.15 m とし、爆源の深さは水面より 40 cm とした。圧力計は、Fig. 1.17 に示すように雷管軸となす角度 ϕ が 0 度、20 度、40 度および 90 度の 4 方向に配置した。このように圧力計を 4 方向に配置したのは、水中圧力波の伝播に方向性があるかどうか、また爆源の形状が水中圧力波に影響を及ぼすかどうかについて検討するためである。

爆源と圧力計の距離は 22 cm ~ 1 m とした。また、薬量の影響について検討するために、爆源には 1 本、2 本、5 本の瞬発電気雷管をそれぞれ束にして用いた。

一方、圧力測定法は、第 1.2 節において述べた方法によった。ただし、この実験に使用した受圧素子は電気石ゲージである。

さて、雷管衝撃によって発生する水中圧力波を測定する場合、高域周波数応答性をもっとも問題となる。その理由は、水中爆発に伴う水中圧力波の衝撃波時定数 θ の値は、薬量が少ないほ

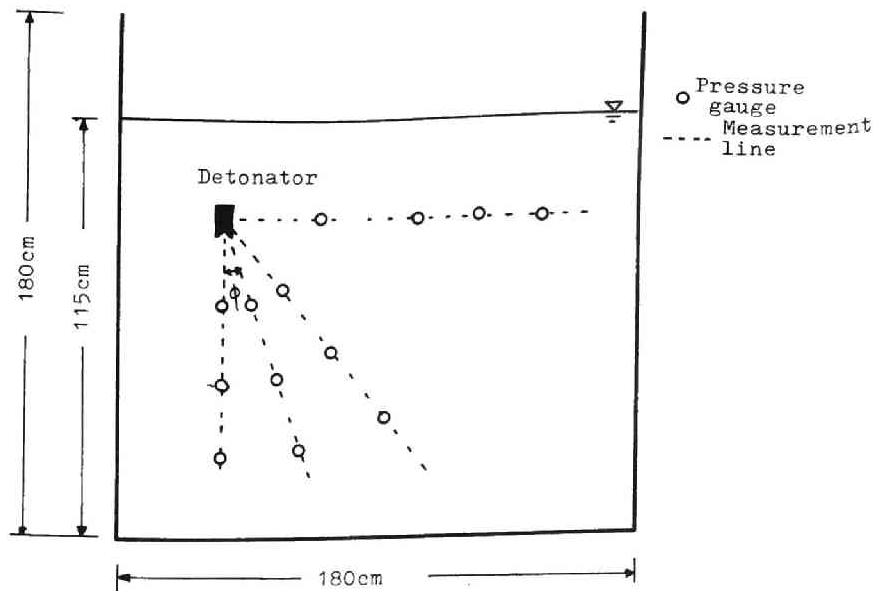


Fig.1.17 Experimental apparatus

ど、また爆源からの距離が短い程小さくなるからである。Fig. 1.18 には R.H.Cole によって得られた衝撃波時定数 θ と薬量 W ならびに爆源からの距離 R との関係を示した⁶⁾。図

中の実線は実測値であり、点線は Kirkwood-Bethe の理論によって求めたものである。この図から、爆源から離れるにしたがって θ の値が大きくなることがわかる。しかし、この図では薬量と θ の関係が判然としないため、Fig. 1.18 に示した実測値をもとに、距離が 5 m, 10 m および 50 m の場合について薬量 W と θ との関係を改めて書きかえると Fig. 1.19 に

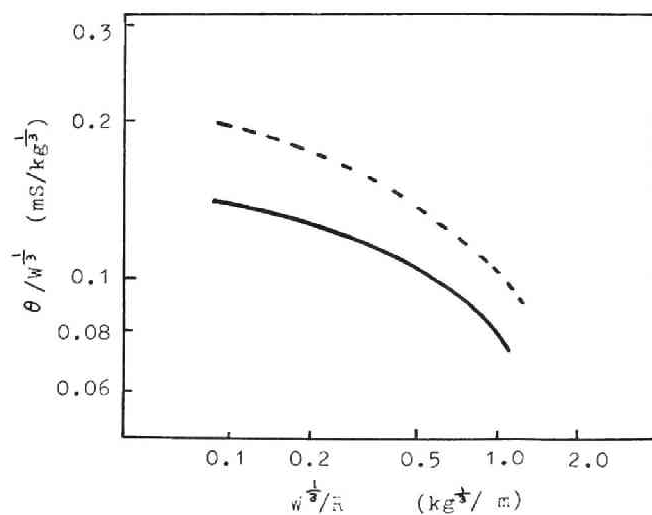


Fig.1.18 Relation between $\theta/W^{1/3}$ and $W^{1/3}/R$

示すとおりになる。この図によれば、薬量が小さくなるにつれて、衝撃波時定数 θ の値が小さくなるがよくわかる。ところが、本実験では、雷管という非常に薬量の少ない爆源を用い、ま

た爆源から圧力測定点までの距離を1 m以下というように短くしている。したがって、本実験では、 θ の値がきわめて小さくなるような圧力波形を測定しなければならないことになり、そのために、とくに精度の高い高域周波数応答性が要求されることになる。これらのことを考慮して、本実験では、現在市販されているもののうちではもっとも

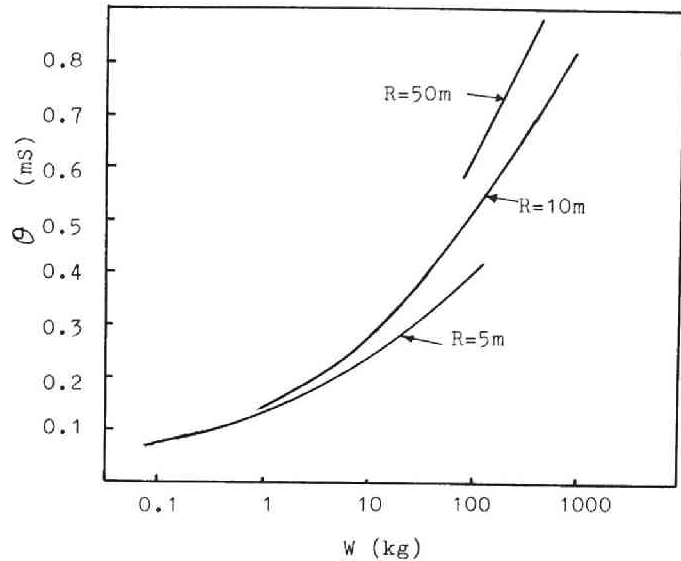


Fig.1.19 Relation between θ and W

小さい直径 6.35 mm の電気石ゲージを使用して高域周波数応答性を高めるよう努めた。

Fig. 1.20 は本実験に用いた測定系のブロックダイアグラムを示したものである。一応、

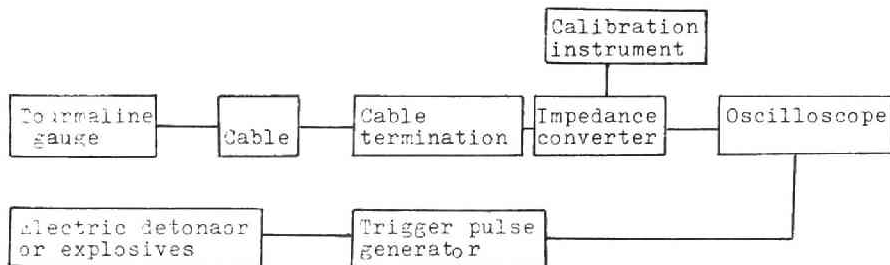


Fig.1.20 Block diagram of measurement system.

ターミネーション回路を設けたが、ケーブルの長さが短かいので、ケーブル端での反射の影響を考慮する必要はなかった。また、圧力波形の時定数が小さく、低域周波数応答性は充分であるから、インピーダンス変換増幅器は用いずに、直接ブラウン管オシログラフの増幅器の入力に信号を送るようにした。また、トリガーパルス発生装置はブラウン管オシログラフの時間軸掃引用同期信号を送るために用いたものである。Fig. 1.21 にはトリガーパルス発生装置の回路を示した。まず、実験準備を終えた段階でスイッチSを閉じると、雷管に巻きつけた導線に電流が流れる。この状態で雷管が爆発するとその瞬間に導線が切れ、電流が遮断される。この時の電流変化がトランスを通じてブラウン管オシログラフの掃引同期回路に信号として送られ、時間軸の掃引が開

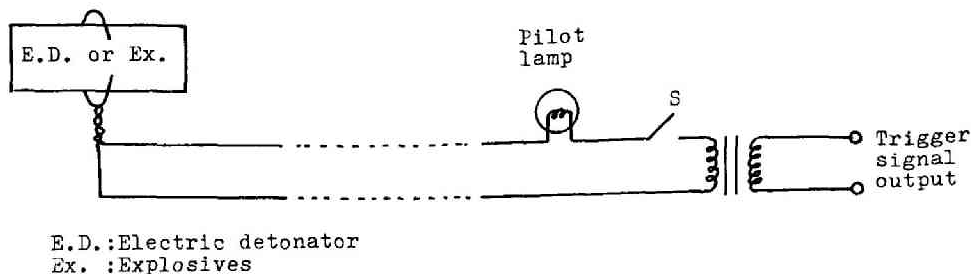


Fig.1.21 Trigger pulse generator circuit

始される。そのため、ブラウン管オシログラフの時間軸の掃引は、雷管の爆発時に同期して開始するようになっている。今回採用した同期方法は、同期信号をトランスによって昇圧して送っているため、同期レベルを高く設定することができ、ノイズなどによって誤掃引することはほとんどなく、好ましい方法である。

1.3.2 実験結果および考察

(a) 圧力波形について

Fig. 1.22 は本実験で得られた水中圧力波の圧力波形の一例を示したものである。さらに圧力波が測点に到達した後の時間を横軸にとり、縦軸には圧力の大きさ P を圧力最高値 P_m で割

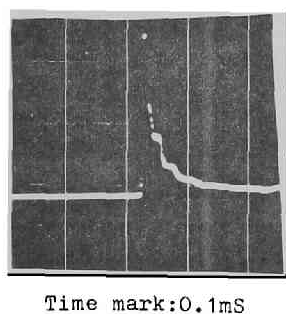


Fig.1.22 Example of wave-form of underwater pressure wave due to electric detonator explosion. (Number of detonator:1, $R=0.5m$, $\phi=90^\circ$)

った値を対数目盛で表わして、この圧力波形を片対数方眼紙上に描きなおしたのが Fig. 1.23 である。また図中の点線はつぎの(1.13)式で示される関係を示したものであり、さらにまた、一点鎖線は(1.13)式において、 θ の値を $25 \mu S$ とした場合の関係を表わしたものである。

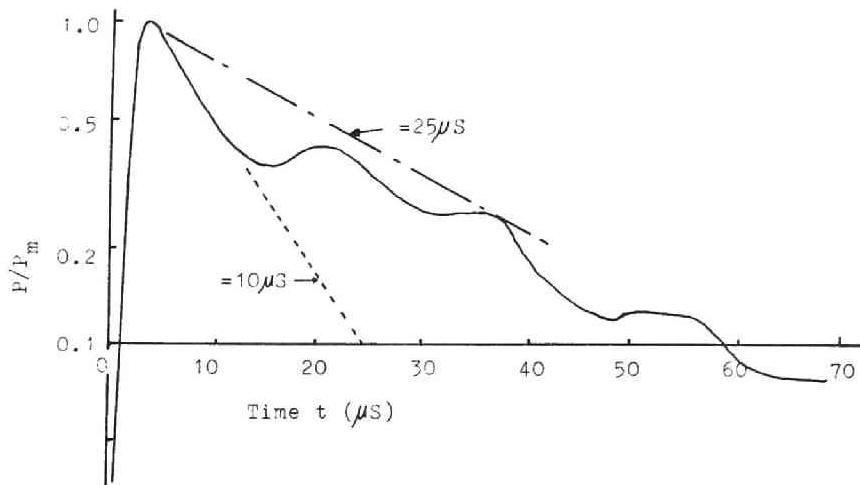


Fig.1.23 Semilogarithmic plot of underwater pressure against time (Electric detonator).

$$\frac{P}{P_m} = e^{-\frac{t-t_1}{\theta}} \quad (t \geq 7.5 \mu s) \quad \dots\dots\dots (1.13)$$

ここに、 t : 圧力波到達時間 (μs)

$$t_1 = 4 \mu s$$

$$\theta = 10 \mu s$$

Fig. 1.22 より明らかなように、この例に示した水中圧力波は4マイクロ秒という非常に短い時間で圧力零から最高圧まで上昇し、その後圧力は(1.13)式に示す関係を保ちつつ減衰するが、途中で(1.13)式で示される関係からはずれ、よりゆるやかに減衰していく。このように、雷管衝撃により生ずる水中圧力波については、圧力が最高値となってから非常に短時間の間の波形は近似的に(1.1)式で表わすことができるが、それ以後の圧力の減衰は(1.1)式で示されるそれよりも小さくなる。また、時定数 θ の値が小さく、圧力が零から最高圧まで上昇するまでの立ち上がり時間も θ とほぼ同じ程度の短時間であることも注目すべき特徴である。

(b) 圧力最高値について

つぎに、圧力の最高値について検討してみる。従来、爆薬の水中爆発に伴って生ずる水中圧力波の圧力最高値と薬量ならびに爆源からの距離との間の関係を示す式は多くの研究者によって種々の形で与えられている。それらの式の中でも、とくにR.H.Coleによって、与えられた式がもっとも権威あるものとして引用されることが多い⁷⁾。R.H.Coleは薬量が0.25, 1.72, 3.40

23.1 および 36.3 Kg のそれぞれの場合について，球状のベントライトを用いて水中圧力波の測定実験を行ない，得られた結果を整理してつぎの関係式を示した。

$$P_m = 537 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.14)$$

ここに， P_m : 圧力最高値 (Kg/cm^2)

W : 薬量 (Kg)

R : 爆源からの距離 (m)

ただし， $0.1 < W^{\frac{1}{3}}/R < 1.0$ ($Kg^{\frac{1}{3}}/m$)

さて，著者が雷管衝撃を用いて測定した水中圧力波の圧力最高値は Table 1.2 ($\phi = 0^\circ$)，Table 1.3 ($\phi = 20^\circ$)，Table 1.4 ($\phi = 40^\circ$) および Table 1.5 ($\phi = 90^\circ$) に示すとおりである。なお， ϕ が 0 度，20 度および 40 度の場合には 6 号電気雷管 1 本の爆発による水中圧力波を測定したが， ϕ が 90 度については薬量の影響を検討するために，6 号電気雷管 1 本，2 本，5 本をそれぞれ爆源とした時ならびに参考として 10 g のテトリルおよび 10 g のダイナマイトをそれ

Table 1.2 Maximum pressure P_m of underwater pressure wave due to electric detonator explosion. ($\phi = 0^\circ$)

Number of E.D.*	Distance from explosion source, R (m)	Maximum pressure, P_m (kg/cm^2)	K
1	0.64	34.8	299
1	0.64	34.8	299
1	0.64	40.6	349
1	0.64	38.7	332
1	0.64	38.2	330
1	0.62	39.6	328
1	0.62	38.7	321
1	0.62	40.6	336
1	0.62	40.6	336
1	0.62	40.6	336
1	0.34	94.1	395
1	0.34	97.8	411
1	0.34	99.0	416
1	0.32	101	396
1	0.32	108	422
1	0.32	103	403
1	0.24	150	424
1	0.24	163	462
1	0.24	155	440
1	0.24	175	495
1	0.22	183	469
1	0.22	155	399
1	0.22	175	449
1	0.22	188	483
1	0.34	98.0	410
1	0.32	103	403
1	0.32	100	392

*E.D.: Electric detonator

Table 1.3 Maximum pressure P_m of underwater pressure wave due to electric detonator explosion. ($\phi=20^\circ$)

Number of E.D.*	Distance from explosion source, R (m)	Maximum pressure, P_m (kg/cm ²)	K
1	0.64	39.4	338
1	0.64	42.6	366
1	0.64	43.8	376
1	0.62	46.1	382
1	0.62	46.1	382
1	0.34	85.8	360
1	0.34	87.1	366
1	0.34	85.8	360
1	0.32	82.3	341
1	0.32	92.7	386
1	0.24	138	387
1	0.24	139	391
1	0.24	139	391
1	0.24	139	391
1	0.22	158	412

* E.D.:Electric detonator

Table 1.4 Maximum pressure P_m of underwater pressure wave due to electric detonator. ($\phi=40^\circ$)

Number of E.D.*	Distance from explosion source, R (m)	Maximum pressure, P_m (kg/cm ²)	k
1	0.64	36.2	311
1	0.64	37.8	325
1	0.64	40.6	349
1	0.64	38.8	333
1	0.64	38.2	328
1	0.62	37.6	311
1	0.62	43.1	357
1	0.62	43.1	357
1	0.62	42.3	350
1	0.62	43.1	357
1	0.34	75.6	316
1	0.34	85.1	358
1	0.34	87.0	365
1	0.34	85.1	358
1	0.34	83.2	350
1	0.32	86.1	358
1	0.24	110	310
1	0.24	119	335
1	0.24	131	369
1	0.24	131	369
1	0.24	130	366

*E.D.:Electric detonator

Table 1.5 Maximum pressure of underwater pressure wave due to electric detonator.
($\phi=90^\circ$)

Number of E.D.*	Distance from explosion source, R (m)	Maximum pressure, P_m (kg/cm ²)	K	Average of K
1	0.30	101	368	374
1	0.30	109	398	
1	0.50	56.6	368	
1	0.50	57.0	370	
1	0.50	57.7	375	
1	0.50	57.9	376	
1	0.50	59.1	384	
1	0.50	59.3	385	
1	0.50	59.7	388	
1	0.54	51.3	363	
1	0.54	51.7	366	
1	0.54	53.4	378	
1	1.00	25.7	365	
1	1.00	25.8	367	
1	1.00	25.8	367	
2	0.50	72.4	362	373
2	0.50	74.0	370	
2	0.50	75.3	377	
5	0.50	76.8	384	454
5	0.50	122	432	
5	0.50	129	458	
***10g	0.50	133	472	343
***10g	0.50	147	350	
***10g	0.50	150	356	
***10g	0.50	136	324	481
***10g	0.50	184	476	
***10g	0.50	184	476	
***10g	0.50	190	492	

*E.D.:Electric detonator
**No.3 kiri dynamite
***Tetryl

それ爆源とした時生ずる水中圧力波の測定を行なったので、これらの結果もあわせて Table 1.5 に示した。ここで、R.H.Cole の実験式と比較するために、これらの実験値についても、 $P_m = K (W^{1/3}/R)^{1.13}$ という関係が成り立つものとして求めた K の値を Table 1.2~Table 1.5 にあわせて示しておいた。ただし、この計算に用いた電気雷管の薬量は、6号雷管の薬量が起爆薬 0.42g、添装薬 0.45g とされているので⁸⁾、この合計量 0.87g を雷管 1本の薬量とした。Table 1.2~Table 1.5 に示した結果にもとづいて、圧力最高値 P_m と $W^{1/3}/R$ との関係を方向別に整理して両対数方眼紙上に示すと Fig. 1.24~Fig. 1.27 が得られ、 P_m と $W^{1/3}/R$ との関係は次式によって表わされることがわかる。

$$P_m = K (W^{1/3}/R)^\alpha \quad \dots\dots\dots (1.15)$$

そこで、最小自乗法を用いて各方向ごとに得られた測定結果を整理し、それぞれの方向別に(1.15)式中の定数 K と指数 α の値を求めると、Table 1.6 に示すようになる。Table 1.6

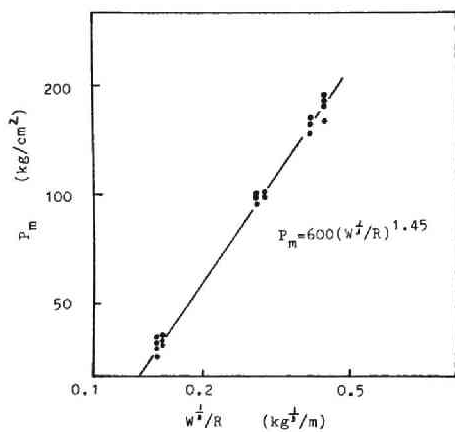


Fig. 1.24 Relation between P_m and $w^{1/3}/R$.
($\phi=0^\circ$)

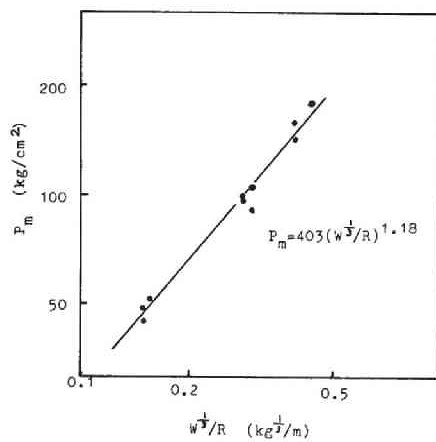


Fig. 1.25 Relation between P_m and $w^{1/3}/R$.
($\phi=20^\circ$)

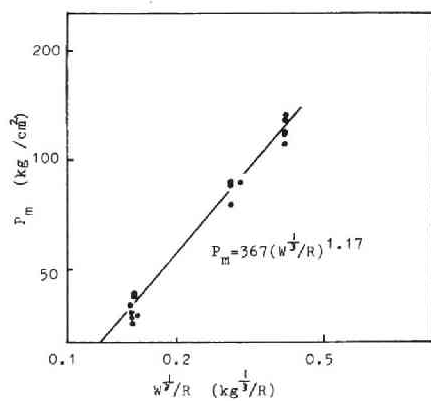


Fig. 1.26 Relation between P_m and $w^{1/3}/R$.
($\phi=40^\circ$)

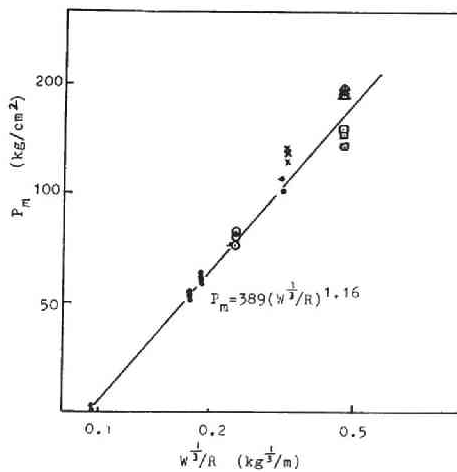


Fig. 1.27 Relation between P_m and $w^{1/3}/R$.
($\phi=90^\circ$)

に明らかなように、 $\phi = 0^\circ$ の方向を除き、その他の方向での α の値はいずれも R.H.Cole が示している 1.13 に近い値が得られているが ϕ が 0° の方向の α の値のみがそれらにくらべてかなり大きな値となっており、特異性を示している。

Table 1.6 K and α

Direction	K	α
$\phi = 0^\circ$	600	1.45
$\phi = 20^\circ$	403	1.18
$\phi = 40^\circ$	367	1.17
$\phi = 90^\circ$	389	1.16

そこで、その理由を探るために、爆源の形の影響について考えてみよう。Fig. 1.28 において、微小要素 dx から距離 r だけ離れた点 S における圧力 P は近似的に次式によって求めることができる⁹⁾。

$$P = P_0 \int f(\tau, x) dx \quad \dots\dots\dots (1.16)$$

ここに、

$$f(\tau, x) = \begin{cases} \frac{e^{-\tau/\theta''}}{r} & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases}$$

$$\tau = t - r/C - x/D$$

P_0, θ'' : 定数

r : 微小要素 dx の中心から S 点までの距離

X : 起爆点から微小要素 dx までの距離

D : 爆轟速度

C : 水中の衝撃波伝播速度

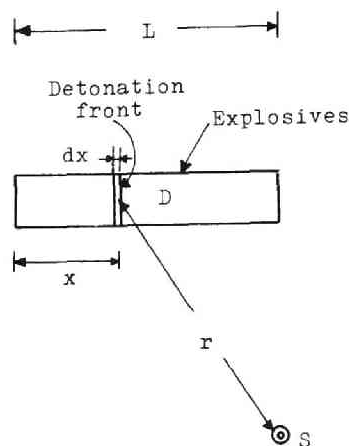


Fig.1.28 Diagram for calculation of pressure at any point S.

ただし、この近似式はつきに示す仮定が成立するものとして作られたものである。

- (i) 水中での衝撃波の伝播速度は一定である。
- (ii) 電気雷管の爆轟速度は x に無関係に一定である。
- (iii) 雷管の爆発により生ずる爆轟圧はその形に無関係に一定である。
- (iv) 雷管の直径は無視し得るものとする。

そこで、 $\theta'' = 3 \mu S$ 、 $5 \mu S$ および $10 \mu S$ のそれぞれの場合について (1.16) 式を解き、圧力最高値 P_m と P_0 の比 P_m/P_0 と雷管の中心からの距離 R との関係を求めると、Fig. 1.29 Fig. 1.30 および Fig. 1.31 に示すとおりになる。ただし、この計算においては、雷管の長さを 2 cm 、爆速を $6,000 \text{ m/S}$ 、水中の衝撃波の伝播速度を $1,500 \text{ m/S}$ とした。これらの図より、距離減衰指数 α の値は、爆源近傍では方向によって異なるが、 $\theta'' = 3 \mu S$ では約 4 cm 以上、

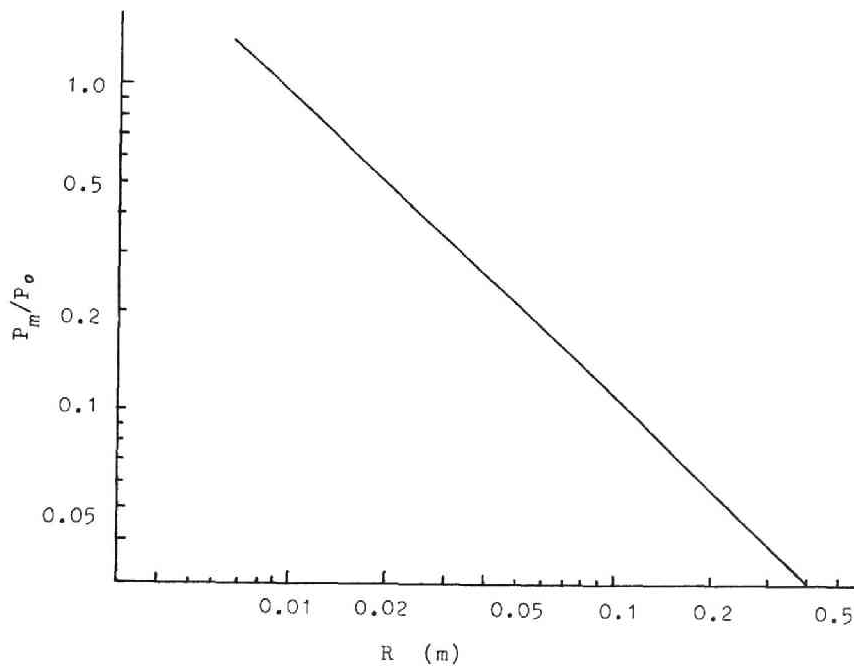


Fig.1.29 Relation between calculated P_m/P_o and R
 $(\theta''=3\mu S, \phi=90^\circ)$

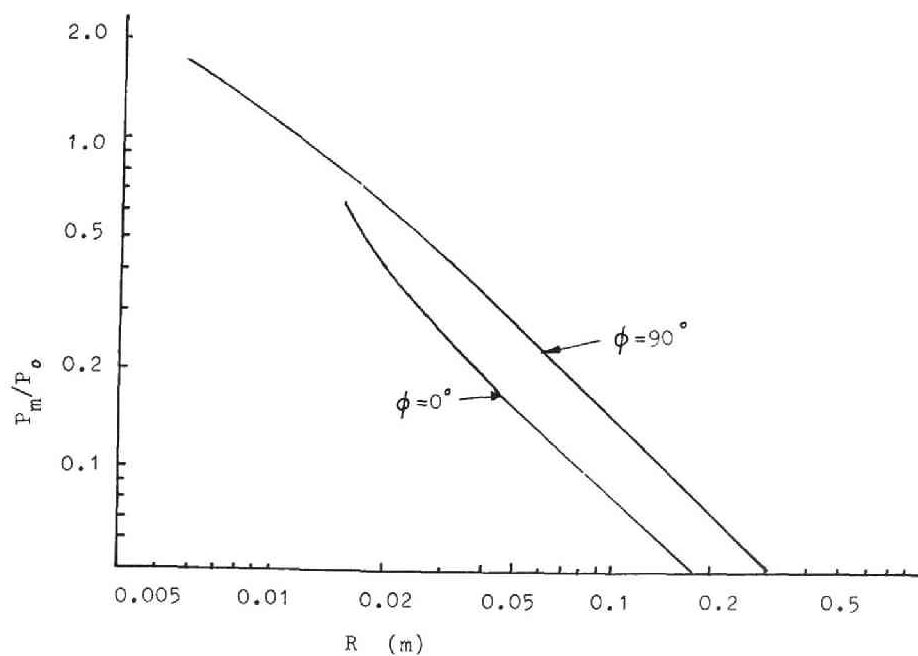


Fig.1.30 Relation between calculated P_m/P_o and R
 $(\theta''=5\mu S)$

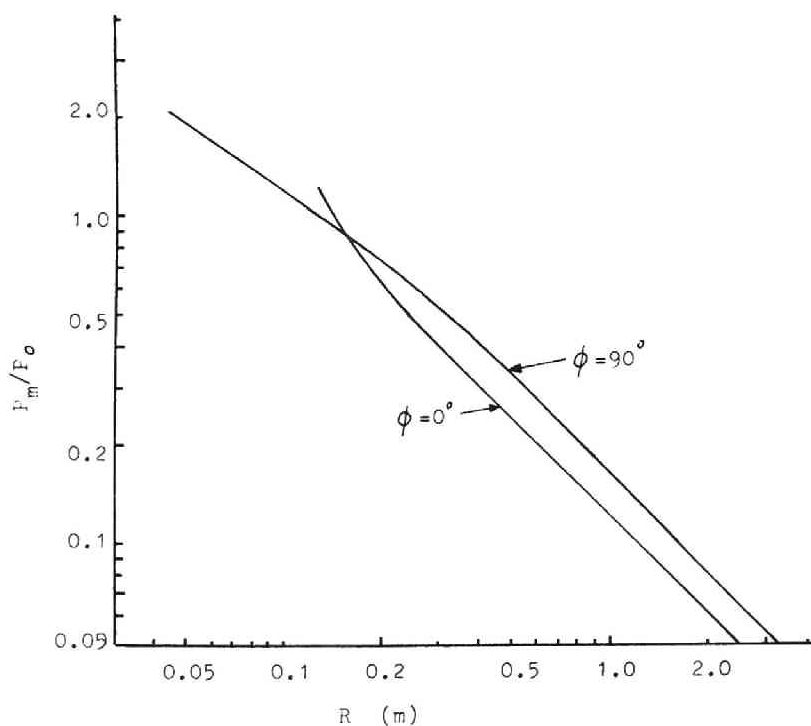


Fig.1.31 Relation between calculated P_m/P_0 and R
($\theta''=10\mu S$)

$\theta''=5\mu S$ では約 $8cm$, $\theta''=10\mu S$ では約 $20cm$ 以上離れると方向による差がなくなることがわかる。そこで、雷管衝撃に伴う水中圧力波の波形の θ'' を求めることにする。

Fig. 1.32 および Fig. 1.33 は、それぞれ $\theta''=10\mu S$, $R=20cm$ および $\theta''=3\mu S$, $R=1cm$ について (1.16) 式を解いて得られた圧力-時間曲線を示したものである。これらの図に明らかにように、擾乱が始まって

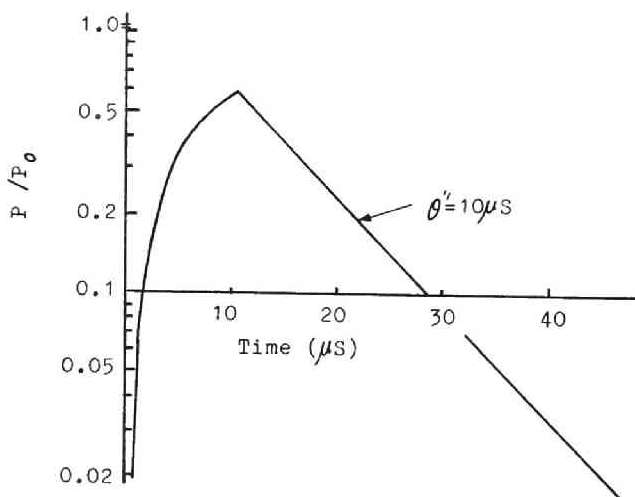


Fig.1.32 Calculated P/P_0 of underwater pressure wave due to underwater explosion of electric detonator.
($\theta''=10\mu S$, $\phi=0^\circ$, $R=0.2m$)

から約 $10 \mu\text{S}$ 経過した後は (1.1) 式で表わされる波形となっており, その減衰時定数 θ は θ'' と一致している。一方, 雷管衝撃に伴う水中圧力波の波形の θ は前述のように約 $10 \mu\text{S}$ であるため, θ'' も $10 \mu\text{S}$ であるが, この場合 20 cm 以上離れると距離減衰指数 α の値は方向に無関係に一定となる。ところが, 実験結果では $R > 20 \text{ cm}$ においても $\phi = 0$ の方向での α の値は他の方向にくらべて大きい値となっているが, この理由について以下に若干の推論を行なう。

この原因としてもっとも可能性

の強いものに, 爆轟の方向の影響およびノイマン効果をあげることができる。先に述べた (1.16) 式による計算では, 仮定 (iv) に示すように, 雷管の爆発により生ずる爆轟圧はその形には無関係であり, 雷管の側面方向および底面方向には同じ圧力が生ずると考えている。しかし, 現実には雷管内での爆轟は軸方向に進み, 粒子速度による圧力はほとんど底面方向に加わるものと考えられるので, 側面方向にくらべて底面方向の方が圧力が大きくなる。さらに, ノイマン効果により底面方向には高压のジェットが生ずる。そのため, 底面から伝わる衝撃波は側面方向に伝わるそれよりも速くなり, Fig. 1.34 に示すように, 衝撃波面の形は (1.16) 式を用いて

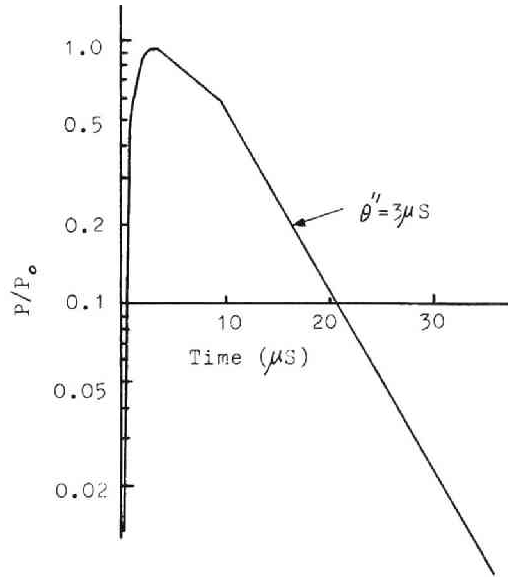


Fig.1.33 Calculated P/P_0 of underwater pressure wave due to underwater explosion of electric detonator. ($\theta'' = 3 \mu\text{S}$, $\phi = 90^\circ$, $R = 0.01 \text{ cm}$)

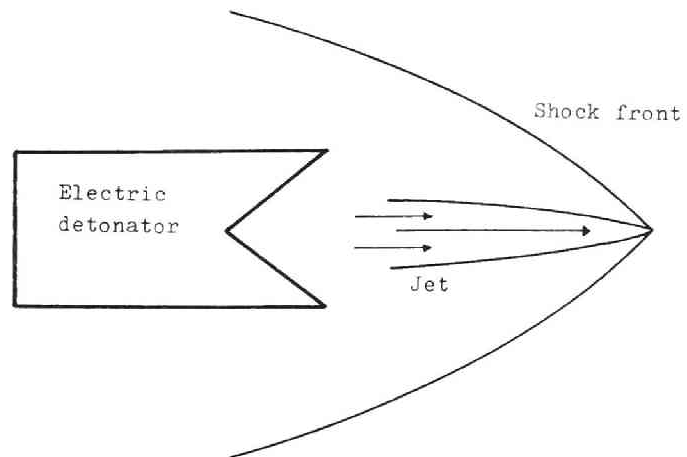


Fig.1.34 Deformation of shock front due to Neumann effect.

求められる波面のそれとは異なり、あたかも爆源の長さが長くなった場合に得られる波形に近似してくる。その結果、側面方向における波面の曲率は大きくなり、底面方向におけるそれは小さくなるので、 $\phi = 0^\circ$ 方向の α の値は $\phi = 90^\circ$ のそれにくらべて大きくなるものと推定される。

さて、Table 1.2 ~ 1.5 に示した K の値の平均値を求めると、 $\phi = 0^\circ$ の方向で $K = 390$ 、 $\phi = 20^\circ$ の方向では $K = 375$ 、 $\phi = 40^\circ$ の方向で $K = 344$ 、 $\phi = 90^\circ$ の方向（テトリルおよびダイナマイトのデータは除く）では $K = 385$ となる。一方、R.H.Cole が求めた K の値は前に述べたように 537 である。このように、今回の雷管衝撃による実験で得られる K の値はいずれの方向においても、R.H.Cole の求めた値より小さくなっている。ただし、 $\phi = 0^\circ$ の方向での α の値が R.H.Cole が求めた値とは異なっているので、この方向での衝撃圧の大きさについて単純に K の値のみの比較により検討することには問題があるが、その他の方向においては両者の実験で得られた α の値がほぼ一致しているので、 K の値を比較することにより、水中衝撃圧の大きさについて論ずることができる。そこで、雷管衝撃によって得られた K の値、いかえれば水中衝撃圧が R.H.Cole の実験値にくらべてなぜ小さくなったかについて考察してみよう。

まず、爆源の形状の影響について考えてみる。R.H.Cole が Kirkwood-Bethe の理論を用いて考察した結果によると¹⁰⁾、円筒状爆薬の爆発に伴う水中衝撃圧は、爆源近傍では球状装薬の場合と異った伝播特性を示すが、爆源から離れるにつれて球状装薬とほぼ同様な伝播特性を示し、爆薬の側面方向への伝播の場合、爆源からの距離 R が薬長 L の約 $1/2$ 以下では、薬長が無限大の爆薬による水中衝撃圧と同一の距離減衰を示すが、これ以上の距離では、徐々に球状装薬の爆発の場合に得られる距離減衰性を示すようになり、ほぼ $2L$ 以上の距離においては完全に球状装薬の爆発の際の距離減衰性を示すことを指摘している。今回用いた電気雷管の L はほぼ 20mm であるから、上記のことを考慮すると R が 4cm 以上の距離では、電気雷管を用いても、生ずる水中衝撃圧の距離減衰性は球状装薬を用いた場合のそれとほぼ同じになり、したがって、今回の実験については、爆源の形状の影響は K の値の違いに対して支配的な因子とはなっていないと考えてよい。

つぎに、爆薬の爆轟性の問題が考えられるが、雷管に使用されている起爆薬および添装薬は少量でも十分な定常爆轟を起こすので、この点については問題はないと考えられる。ただし、起爆薬は添装薬にくらべて威力が弱いので、 K の値を求める計算において起爆薬も添装薬と等価に扱っていることが K の値に影響していることは考えられる。

さらに、水中圧力波の伝播する媒質の相違が水中衝撃圧の大きさに及ぼす影響について考えてみよう。すなわち、R.H.Cole の実験は海水中で行っており、今回の実験は純水中で行ったからである。Kirkwood-Bethe の理論によれば、伝播する媒質の特性を考慮に入れた場合水中爆発に伴う水中衝撃波の最高圧 P_m は (1.17) 式によって求めることができる¹¹⁾。

$$P_m = \rho_0 C_0 \sqrt{\frac{K_1}{\beta}} \left(\frac{1}{a_0^2} \int_0^{\tau_0} G(a, t) dt \right)^{1/2} \left(\frac{a_0}{R} \right) \left(\log \frac{R}{a_0} \right)^{-1/2}$$

..... (1 . 17)

ここに, ρ_0 : 媒質の密度

C_0 : 媒質中の音速

K_1 : 爆源の状態と爆源近傍のエネルギー損失によって決まる関数

β : 媒質の状態方程式に関する定数

$G(a, t)$: 爆源の Kinetic enthalpy

a_0 : 爆源の半径

R : 爆源からの距離

(1 . 17) 式より明らかなように, 水中衝撃波の最高圧 P_m は, 媒質の密度と媒質中の音速の積に比例する。たとえば, 水温 20℃, 1 気圧の状態での純水の密度は 0.99820 g/cm^3 で, 音速 C_0 は 1483 m/S である。一方, 海水については, 場所によって差はあるが, 20℃, 1 気圧における密度は約 1.029 g/cm^3 であり, 音速は 1510 m/S である。したがって, このことのみを考慮したとしても, 純水中を伝播する圧力波の最高圧は海水中を伝播する圧力波のそれよりも約 8% 小さくなることになる。しかし, 今回の電気雷管の爆発により生じた水中圧力波の最高圧について求めた K の値は, Cole による実験結果にくらべて 25% ~ 30% も小さくなっていることを考慮すると, 純水を媒質として実験したことによる影響は K の値の相違に対してやはり支配的な因子とはなっていないものと考えられる。

しかし, 電気雷管のような小薬量の爆薬が爆発した場合に生ずる水中圧力波に対しては, 水への熱拡散(水の冷却効果)の影響が強く作用し, 爆源近傍におけるエネルギー損失が大きくなる。そのため, 爆源近傍における圧力の距離減衰指数が大きくなり, 薬量の多い爆薬を用いた場合に比べれば K の値が小さくなるものと推定される。薬量の影響を調べるために行なった $\phi = 90^\circ$ 方向の実験結果から求めた K の値を Table 1. 5, に示しておいたが, これより各薬量ごとに K の値を平均した値を Table 1. 5 にあわせて示した。これより, 雷管 1 本と 2 本の場合は K の値はほぼ等しいが, 雷管 5 本, テトリル 10 g と薬量が増加するにつれて K の値が増加することがわかる。ただし, ダイナマイトの結果では K の値が小さいが, これはダイナマイトを定常爆轟させるにはあまりにも薬量が少ないためであると考えられる。このように考えると, Table 1. 5 に示した結果は, 上記の推論を裏づけていることになる。

第1.4節 + 火薬および爆薬衝撃による水中圧力波の特性

1.4.1 実験装置および方法

この実験は、三重県度会郡南勢町にある五ヶ所湾内の真珠養殖漁場の一部の海域において実施した。この海域は水深7～12mで、海底には岩盤が露出している。

爆源となる火薬あるいは爆薬は、Fig. 1.35に示すように、海底下3mの位置に吊り下げた状態で設置した。さらに、爆源からの距離が2～40mの数カ所を選び、爆源と一直線に並ぶように圧力計を設

置した。使用した圧力計は、直径がそれぞれ6.35, 12.7, 25.4, 38.0および50.8mmの電気石ゲージである。また、圧力測定方法は第1.2節において説明したとおりである。

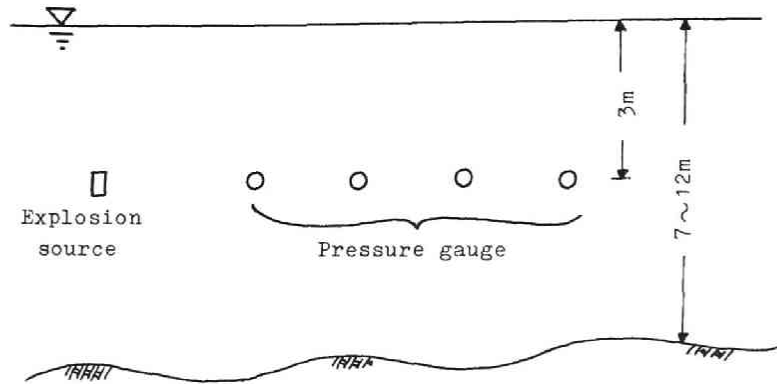


Fig.1.35 Arrangement of explosion source and pressure gauges.

一方、この実験に供した火薬は2種類のシングルベース無煙火薬で、ともに日本油脂株式会社製である。これらの火薬はすべて耐水性をもっていないため、Fig. 1.36のA, B, Cに示す3つの容器のいずれかに密封して実験に供した。すなわち、容器Aはブリキ板で作った外径82.1mm,

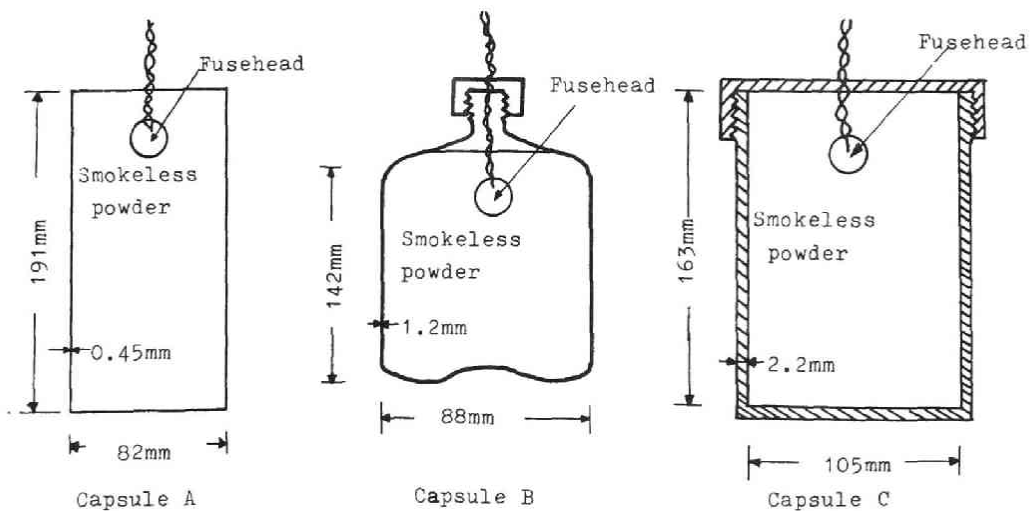


Fig.1.36 Capsule for smokeless powder.

長さ 191.3 mm の円筒型容器であり，容器 B は市販の 1 ℓ 用ポリエチレン容器である。さらに容器 C は内径 105 mm，長さ 163 mm の円筒型の鋼製容器で，容器の材料の厚みは 2.2 mm である。以上に述べた 2 種類の火薬と 3 種類の容器を用いて Table 1.7 に示すような 4 種類の爆源を作り，それらの爆発に伴う水中圧力波を測定した。なお，これらの火薬の起爆にはすべて薬量

Table 1.7 Powder used for experiments.

Symbol of E.S.*	Powder	Composition of ** powder (%)	Capsule	Apparent density(g/cm^3)
A	Sporting powder	NC:73.0,Nitre:6.0 Other:21.0	Capsule A	0.45 0.50
B	Sporting powder	NC:73.0,Nitre:6.0 Other:21.0	Capsule B	0.45 0.50
C	Powder for pistol	NC:98.3,DA:1.7	Capsule A	1.3
D	Powder for pistol	NC:98.3,DA:1.7	Capsule C	1.3

*E.S.:Explosion source

**NC:Nitrocellulose,DA:Diphenylamine

16 g の点火玉を使用した。

また，爆薬による衝撃実験の爆源としては，ANFO爆薬，新桐ダイナマイト，溶填 TNT および日本油脂製水中用爆薬の 4 種類の爆薬を使用した。これらのうち，ANFO爆薬は，無煙火薬と同様に耐水性をもたないので，市販の 1 ℓ ならびに 5 ℓ 用のポリエチレン容器に密封して実験に供した。なお，この容器の形状は Fig. 1.36 に示した容器 B と同じである。さらに，新桐ダイナマイトおよび日本油脂製水中用爆薬についてはほぼ立方体となるように成型し，ビニール袋の中に入れ，できるだけ水に濡れないようにした。一方，溶填 TNT は Fig. 1.37 に示すような形に成型したものを実験に供した。なお，供試爆薬の爆速，火薬力，容器の種類，装填比重，起爆のため使用したブースタ爆薬の種類等は Table 1.8 に示すとおりである。

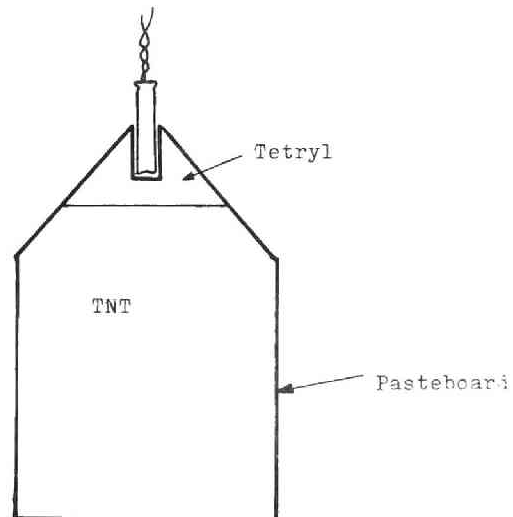


Fig.1.37 Shape of TNT

Table 1.8 High explosives used for experiments.

Symbol of E.S.*	High explosive	Booster	Detonation velocity(m/s)	Force of explosive (kg/cm^2)	Apparent density (g/cm^3)
E	ANFO	No.3 kiri dynamite	3,000 ~4,000	9,570	0.8
F	ANFO	Tetryl	3,000 ~4,000	9,570	0.8
G	Underwater explosive**		6,800 ~7,300	9,000	1.6
H	TNT	Tetryl	6,800 ~7,000	9,700	1.6
I	Shin kiri dynamite		6,500 ~7,000	9,900	1.45

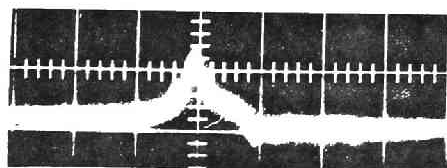
* E.S.:Explosion source.

**Underwater explosive prepared by Nippon Oil & Fat Co.

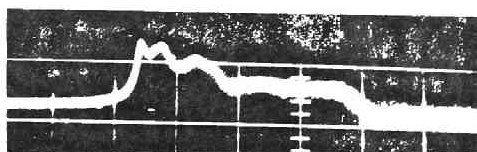
1.4.2 実験結果および考察

(a) 圧力波形について

この実験で得られた代表的な圧力波形を Fig. 1.38 ~ Fig. 1.43 に示す。すなわち, Fig. 1.38 は, Table 1.7 に示した爆源 B (薬量 458 g) を使用した実験の際に得られたもので, a) に示す波形は爆源から 6 m の位置において, また b) に示す波形は爆源から 2.7 m の位置で測定したものである。Fig. 1.39 は, Table 1.7 に示した爆源 C (薬量 1,336 g) を使用した実験において, 爆源から 3.0 m の位置において測定した水中圧力波の波形を示したものである。さらに, Table 1.7



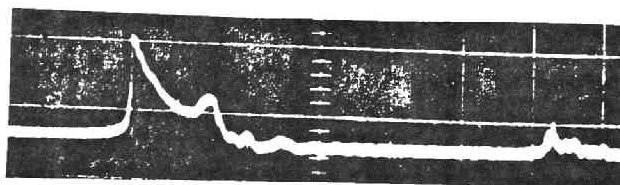
a) R=6m



b) R=2.7m

Time mark:1mS

Fig.1.38 Example of wave-form of underwater pressure wave due to powder explosion. (Explosion source B)

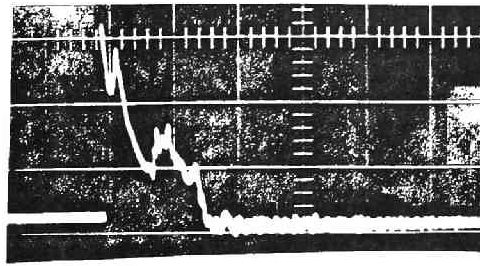


Time mark:1mS

Fig.1.39 Example of wave-form of underwater pressure wave due to powder explosion. (Explosion source C)

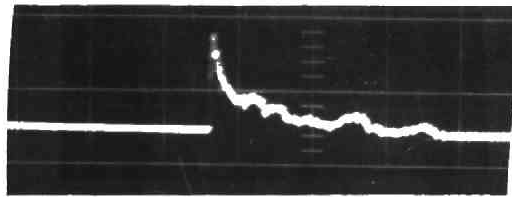
に示した爆源D（薬量1,816 g）を使用した実験において、爆源から3 mの位置で測定した水中圧力波の波形をFig. 1.40に示した。以上はすべて火薬の水中爆発に伴って生じた水中圧力波の波形を示したものであるが、Fig. 1.41, Fig. 1.42, Fig. 1.43はいずれも爆薬衝撃により生じた水中圧力波の測定結果を示したものである。すなわち、Fig. 1.41およびFig. 1.42はそれぞれTable 1.8に示した爆源F（ANFO 爆薬 1,100 g + テトリル 100 g）および爆源H（TNT 1,100 g + テトリル 100 g）を使用した実験において、いずれも爆源から3 mの位置で測定した水中圧力波の波形を示したもので、またFig. 1.43はTable 1.8に示した爆源I（薬量1,000 g）を使用した実験において、爆源から2 mの位置で測定した水中圧力波の波形を示したものである。

さて、以上に示したそれぞれの場合の圧力波形の特徴を明らかにするために、第1.



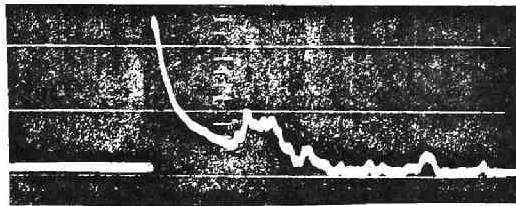
Time mark:1mS

Fig.1.40 Example of wave-form of underwater pressure wave due to powder explosion. (Explosion source D)



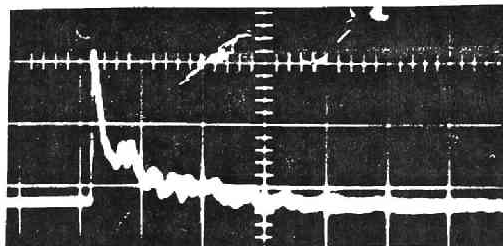
Time mark:0.5mS

Fig.1.42 Example of wave-form of underwater pressure wave due to TNT explosion.



Time mark: 0.5mS

Fig.1.41 Example of wave-form of underwater pressure wave due to ANFO explosion.



Time mark:0.5mS

Fig.1.43 Example of wave-form of underwater pressure wave due to Shin kiri dynamite explosion.

3節において述べた方法と同じ手法を用いて、これらの圧力波形を片対数方眼紙に描きなおして比較検討することにする。Fig. 1.44～Fig. 1.50はそれぞれFig. 1.38,～Fig. 1.43に示した圧力波形を片対数方眼紙上に描きなおしたもので、またFig. 1.51はTable 1.8に示した爆源G（薬量1,000 g）を使用した実験において、爆源から3 mの位置で測定

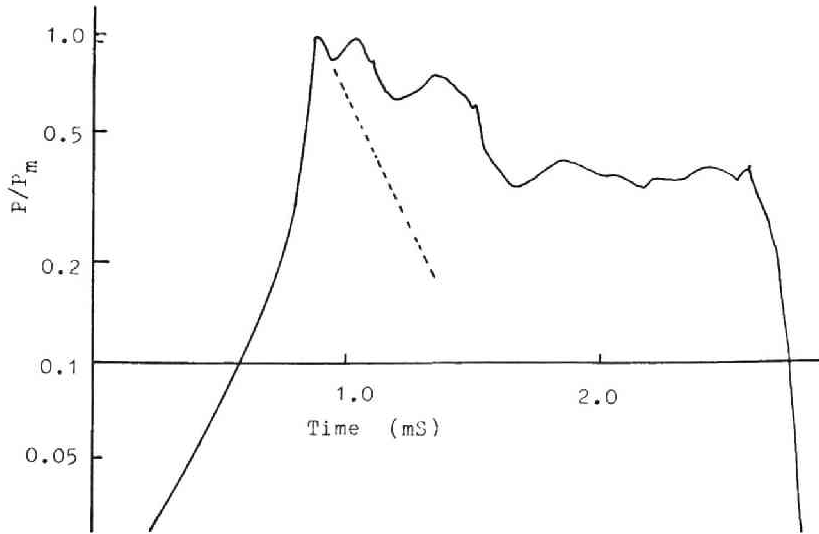


Fig.1.44 Semilogarithmic plot of P/P_m against time.
(Explosion source B, $R=2.7m$)

した水中圧力波の波形を片対数方眼紙上に描いたものである。これらの図において、縦軸には圧力最高値 P_m に対する圧力値 P の比 P/P_m を対数目盛で示し、横軸には圧力波が測点に到達した瞬間からの経過時間をとって波形を示している。

さて、これらの図を比較することにより、まず、火薬類の種類に応じて、圧力の擾乱が始まってからその最高値に

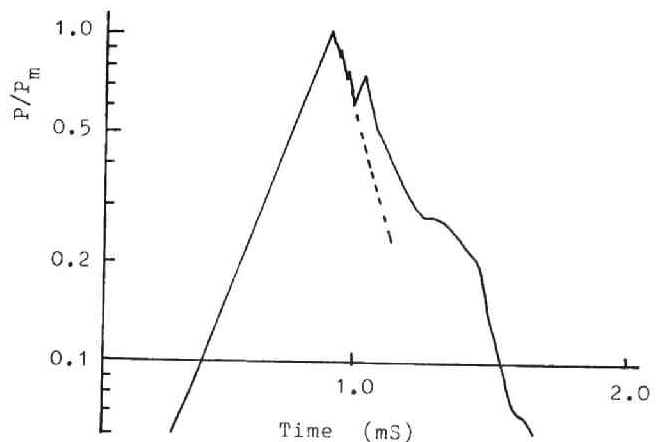


Fig.1.45 Semilogarithmic plot of P/P_m against time.
(Explosion source B, $R=6m$)

達するまでの時間に
大きい差異があるこ
とに気づく。すなわ
ち、爆源Bの場合の
この時間はほぼ 0.9
mS であるが、爆源
Cでは 0.4 mS , 爆
源DやANFOその他の
爆薬の場合にはい
ずれもほぼ 20 μ S
以下の短時間である。

これらのことから、
火薬を用いて衝撃し
た場合に生ずる水中
圧力波の立ち上がり
時間は爆薬を用いて
衝撃した場合に生ず
る水中圧力波の立ち
上がり時間よりはる
かに長いことがわか
る。ただし、火薬衝
撃の場合でも、鋼製
容器を使った爆源D
の場合に生じた水中
圧力波の立ち上がり
時間は非常に短かく、
爆薬衝撃による場合
のそれらと大差はな
い値を示している。

このように、火薬類
の爆発により生ずる
水中圧力波の立ち上

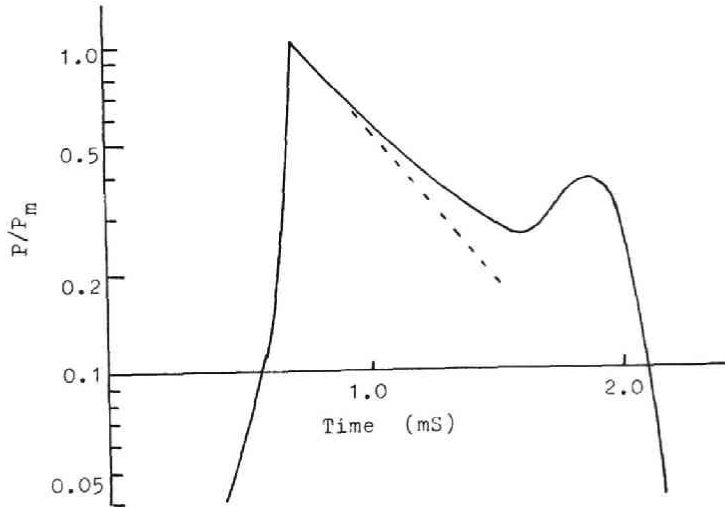


Fig.1.46 Semilogarithmic plot of P/P_m against time
(Explosion source C)

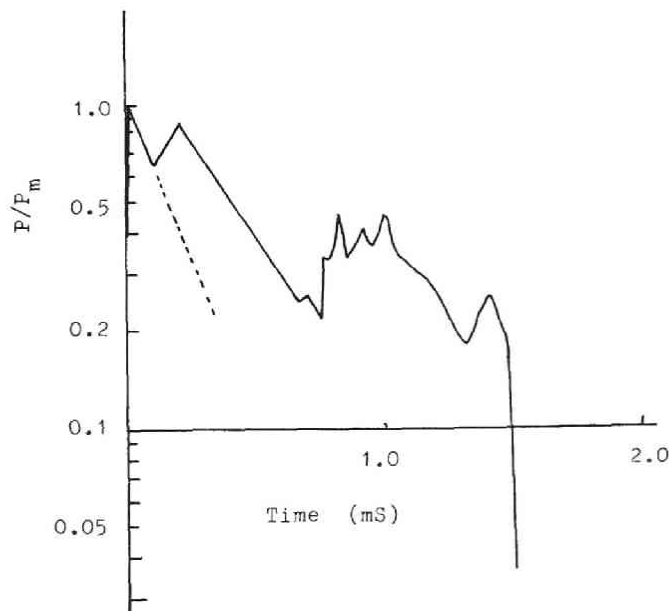


Fig.1.47 Semilogarithmic plot of P/P_m
against time.
(Explosion source D)

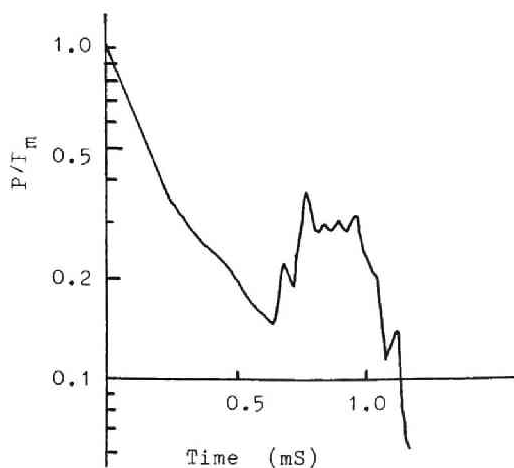


Fig.1.48 Semilogarithmic plot of P/P_m against time. (ANFO)

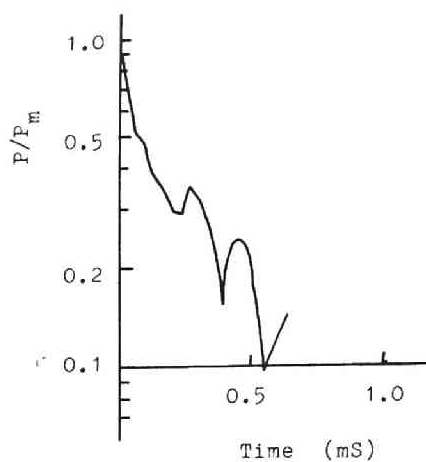


Fig.1.49 Semilogarithmic plot of P/P_m against time. (TNT)

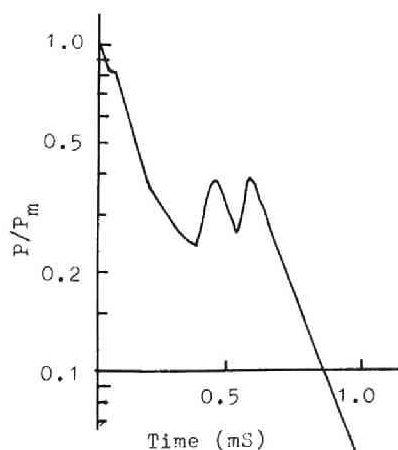


Fig.1.50 Semilogarithmic plot of P/P_m against time. (Shin kiri dynamite)

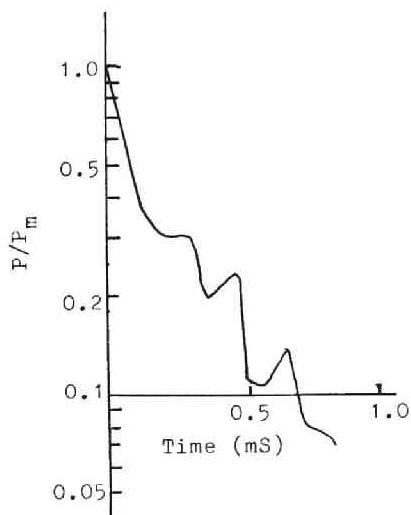


Fig.1.51 Semilogarithmic plot of P/P_m against time. (Underwater explosive)

がり時間は、使用する火薬類の性能のほか、火薬を装填した容器の性質（容器の強度が支配的な因子となっていると考えられる）によっても大きな影響を受けることがわかる。

つぎに、圧力が最高値に達した時点以後の圧力の減衰性について検討することにする。まず、ANFO爆薬、TNT、日本油脂製水中用爆薬および新桐ダイナマイト等の爆薬の爆発に伴って生ずる水中圧力波については、最高値に達して以後の圧力はほぼ $P/P_m = e^{-t/\theta}$ の式で表わされ

る減衰性を示す。しかし、かなり時間が経過したのちの圧力はこのような単純な形で表わすことはできない複雑な圧力変化を示すようになる。ここでは、その減衰が $P/P_m = e^{-t/\theta}$ の形で示される波形部分に注目して、それぞれの爆薬別に定数 θ の値を求めてみると、ANFO 爆薬では約 0.16 mS、新桐ダイナマイトでは約 0.14 mS、日本油脂製水中用爆薬では約 0.11 mS、TNT では約 0.10 mS となる。一方、第 1.3 節 1.3.1 項において述べたように、この θ の値は爆薬の種類、爆薬量および爆源からの距離の関数として決定されるといわれている。ところで、Fig. 1.48 ~ Fig. 1.51 に示した圧力波形は、いずれも 1 ~ 1.2 Kg の薬量を用い、爆源より 3 m 離れた位置（ただし、新桐ダイナマイトの場合を除く）で測定された波形をもとにして描いたものであるから、いずれの波形においても、 θ の値に及ぼす薬量や爆源からの距離の影響には大差がなく、薬種の差による影響のみが θ の値に大きく現われているものと考えることができる。このような考えのもとに得られた θ の値を比較してみると、たしかに薬種によって若干の差を認めることができ、密度および爆速がともに大きい TNT や水中用爆薬の場合の θ の値は比較的小さく、これに対して密度が小さく、爆速の大きな ANFO 爆薬の場合の θ の値が大きくなっていることがわかる。

一方、火薬衝撃によって生じた水中圧力波について、圧力が最高値に達した直後の減衰状態を示す θ の値（Fig. 1.44 ~ Fig. 1.47 において点線で示した直線の θ の値）を求めた結果は Table 1.9 に示すとおりである。また、比較のために、 $W^{1/3}/R$ が等しい場合のペントライト衝撃による水中圧力波の θ の値を Fig. 1.18 より求めて Table 1.9 にあわせて記載した。Table 1.9 より明らかなように、火薬衝撃により生ずる水中圧力波の θ の値はペントライト衝撃の場合のそれに対してほぼ 2 倍の値となっている。このように、火薬衝撃では爆薬衝

Table 1.9 Time constant of underwater pressure wave due to powder explosion.

Explosion source	Charge weight W (kg)	Distance from explosion source R (m)	Time constant θ (mS)	θ^* (Pentolite) (mS)
B	0.458	2.7	0.26	0.091
B	0.458	6.0	0.27	0.104
A	0.504	2.6	0.29	0.092
C	1.336	3.0	0.66	0.121
D	1.816	3.0	0.31	0.136

* Time constant of underwater pressure-wave due to pentolite explosion.

撃にくらべて生ずる水中圧力波の θ の値が大きくなることがわかる。

一方、Fig. 1.41 ~ Fig. 1.43 に明らかなように、爆薬衝撃により生ずる水中圧力波の波形は明らかに衝撃波の波形を呈しており、圧力波の後部を除くとその波形はほぼ (1.18)

式の関数形で表わすことができるが、火薬衝撃により生ずる水中圧力波の波形はこれとは異なり、圧力最高値となるまでの立ち上がり時間が比較的長く、また圧力が最高値に達してから以後の圧力の減衰状態もまちまちで、火薬の種類によってそれぞれ異なった様相を呈している。

$$\begin{aligned} P &= 0 & \tau < 0 & \dots\dots\dots (1.18) \\ P &= P_m e^{-\tau/\theta} & \tau \geq 0 \end{aligned}$$

ここに、 P : 圧力

P_m : 圧力最高値

θ : 衝撃波時定数

τ : 圧力の擾乱が生じ始めてからの時間

このように、火薬衝撃の場合に生ずる水中圧力波の波形が乱れるのは、火薬が一様に燃焼していないためと考えられる。そこでこの問題を、第1.3節において雷管衝撃により生ずる水中圧力波の考察の際に用いた式(1.16)を火薬衝撃の場合に適用し、火薬衝撃により生ずる水中圧力波の波形について考察してみよう。その一例として、火薬と圧力計がFig. 1.52に示すように配置されており、火薬の長さを20cm、火薬の熱焼速度を250m/S、 θ の値を0.2mSと

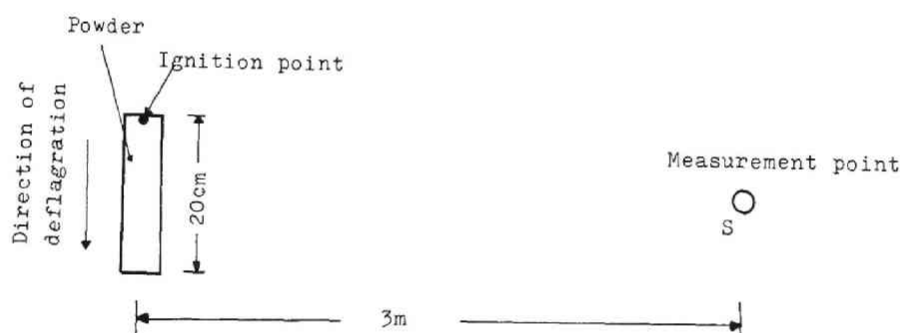


Fig.1.52 Condition to calculate underwater pressure due to powder explosion.

して式(1.16)によって圧力計の位置S点に生ずる圧力波形を求めてみると、Fig. 1.53に示すようになる。図に明らかなように、火薬衝撃により生ずる水中圧力波の圧力の立ち上がり時間は長いという一般的特徴は、この計算結果にもよく現われている。しかし、圧力が最高値に達して以後の圧力の減衰は一様であって、この計算結果では圧力値に大きな乱れは生じていない。これは、この計算では火薬の熱焼速度を一定として取り扱っているからで、熱焼速度が一定の場合は、火薬衝撃の場合でも、水底や水面からの反射など他の影響を受けない限り、圧力最高値をすぎた後の圧力波形に乱れは生じない。ただし、鋼製容器中に火薬を密閉して爆発させた

場合には、火薬の熱焼速度よりも鋼管の破壊の状態が圧力波形に強く影響するものと考えられる。

(b) 圧力最高値について

まず火薬衝撃によって生成した水中圧力波の圧力最高値 P_m と $W^{1/3}/R$ との関係を両対数方眼紙上にプロットすると、Fig. 1.54 に示すようになる。すでに、第1.3節において述べたように、無限に広がる水中で火薬類を爆発させたときに生ずる水中圧力波の圧力最高値 P_m は、爆源近傍を除け

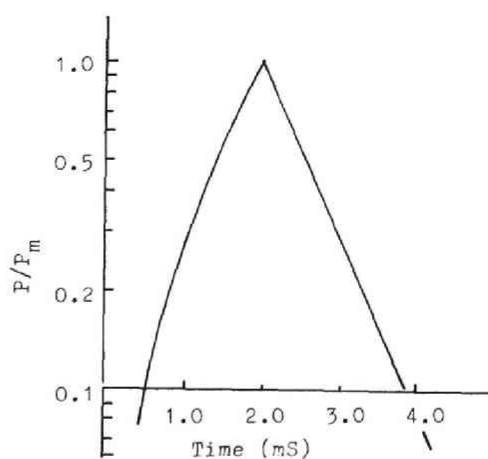


Fig.1.53 Calculated wave-form of underwater pressure wave due to powder explosion.

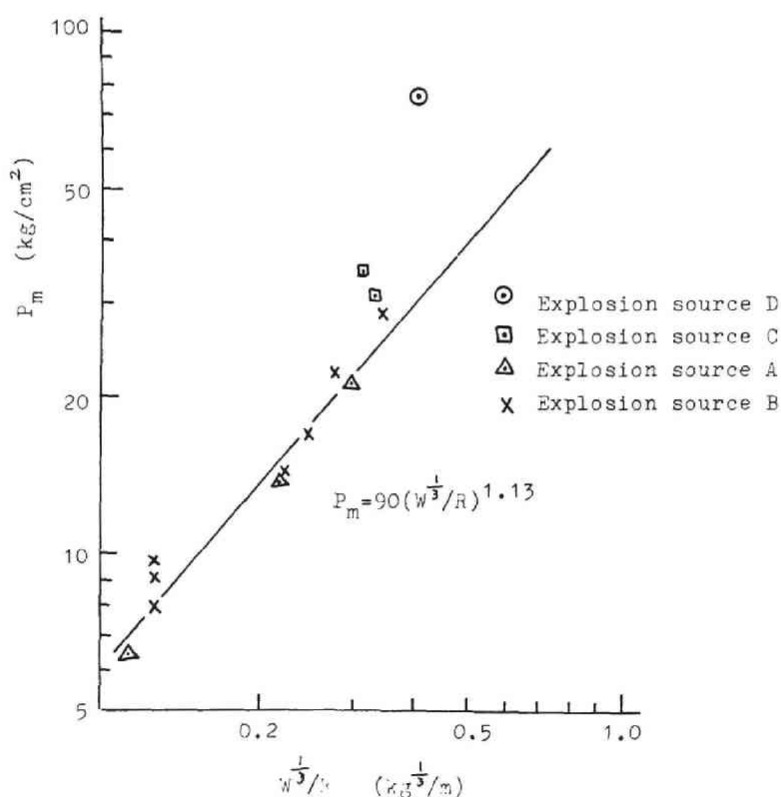


Fig.1.54 Relation between P_m of underwater pressure wave due to powder explosion and $W^{1/3}/R$.

ば一般に $P_m = K (W^{\frac{1}{3}}/R)^{\alpha}$ という式から求めることができる。この場合、 α の値は使用する火薬類の種類には無関係で、R.H.Cole によればこの値はほぼ 1.13 であるとされている。そこで、Fig. 1.54 には、 $\alpha = 1.13$ とした場合の一例として、 $P_m = (W^{\frac{1}{3}}/R)^{1.13}$ の関係を表わす直線をもあわせて示しておいた。この直線と測定値とを対比すれば明かなように、今回の火薬衝撃による実験結果についても、 $P_m = K (W^{\frac{1}{3}}/R)^{1.13}$ という式によって、圧力最高値と $W^{\frac{1}{3}}/R$ との関係を近似的に表わすことができることがわかる。一方、K の値は火薬の種類に応じて異ってくるはずである。そこで、それぞれの火薬を用いて得られた測定値について K の値を求めると、Table 1.10 に示す結果が得られた。したがって、今回の実験で得られた火薬衝撃による水中圧力波の圧力最高値と薬量および爆源からの距離との関係は、それぞれ以下に示す関係式によって表わせることが明らかとなった。

Table 1.10 Maximum pressure P_m and K of underwater pressure wave due to powder explosion

Explosion source	Charge weight W (kg)	Distance from explosion source R (m)	Maximum pressure P_m (kg/cm ²)	K
B	0.450	2.2	29.0	95.5
	0.456	3.4	14.5	77.7
	0.468	3.0	17.2	79.2
	0.468	6.0	9.06	91.3
	0.458	2.7	19.9	82.0
	0.458	6.0	9.67	98.3
	0.468	6.0	8.00	80.6
				Average 86.4
A	0.504	2.6	21.0	80.0
	0.488	7.0	6.30	74.4
	0.470	3.5	14.1	77.2
				Average 77.2
C	1.330	3.3	31.0	107
	1.336	3.0	34.7	108
				Average 108
D	1.816	3.0	74.0	205

爆源 A (薬量 約 500 g) の場合 :

$$P_m = 77.2 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.19)$$

爆源 B (薬量 約 450 g) の場合 :

$$P_m = 86.4 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.20)$$

爆源 C (薬量 約 1,330 g) の場合 :

$$P_m = 107 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.21)$$

爆源 D (薬量 1,816 g) の場合 :

$$P_m = 205 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.22)$$

これらの式から，比例定数 K の値には薬種のほかに容器の種類も影響していることがわかる。また，同一の容器に密封した場合の薬種による K の値の差異を比較するため，同一のブリキ製容器に密封した猟用火薬（爆源 A）とけん銃用火薬（爆源 C）について得られた K の値を対比すると，猟用火薬では約 77，けん銃用火薬では約 107 となっており，同一条件下ではけん銃用火薬により生ずる圧力の方が大きくなることがわかる。一方，(1.16) 式を用いて試算してみると，火薬の長さが等しく，爆源から測点までの距離が同じであれば，熱焼速度が大きい火薬ほど水中圧力波の立ち上がり時間が短くなる。このことを考慮すれば，これらの 2 種類の火薬のうちでは，圧力の立ち上がり時間の短かいけん銃用火薬の方が熱焼速度が大きいものと見なすことができる。また，Table 1.7 に示したように，見掛比重もけん銃用火薬の方が大きい。一般に，熱焼速度や比重の大きい火薬ほど威力が大きい。したがって，猟用火薬にくらべればけん銃用火薬の威力の方が大きく，それに伴って生ずる水中圧力波の圧力値もけん銃用火薬を用いた場合の方が大きくなるものと考えられる。

つぎに，容器による影響について検討する。たとえば，同じ猟用火薬について得られた (1.19) 式と (1.20) 式の K の値を比較すれば明らかなように，ブリキ製容器よりポリエチレン製容器を使った場合の方が，生ずる水中圧力波の圧力の大きさが大きくなる傾向を示しているが，この程度の差は測定誤差範囲とも見なされるので，この 2 つの容器では，及ぼす影響の差はほとんどないものと考えてよい。ところが，けん銃用火薬について，ブリキ製容器を使った場合と鋼製容器を使った場合を比較すると，鋼製容器を使った場合の方がブリキ製容器を使った場合にくらべてほぼ 2 倍近い高い圧力を生じている。このことは，火薬の爆発によって生ずる圧力は火薬を密閉する容器の強度と深い関係をもつことを意味し，強度の強い容器に密封された火薬ほど強い威力を発揮することと関連している。

つぎに，爆薬衝撃によって生成した水中圧力波の圧力最高値について検討する。今回の爆薬衝撃による実験により得られた水中圧力波の圧力最高値 P_m と $W^{\frac{1}{3}}/R$ との関係を両対数方眼紙上にプロットした結果は，Fig. 1.55 ～ Fig. 1.59 に示すとおりである。さらに，それぞれの爆薬を用いて得られた測定値について，火薬衝撃の場合と同様に距離減衰指数の値を 1.13 とした場合の係数 K の値を求めると，Table 1.11 に示すとおりである。そこで，K の値と

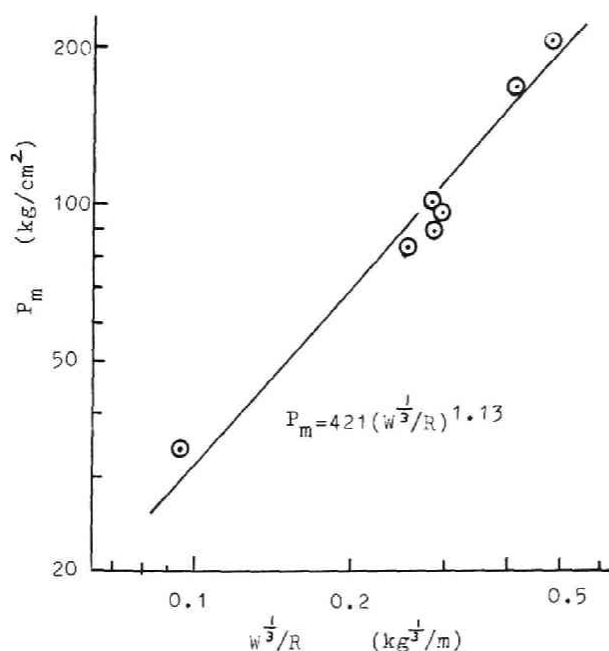


Fig.1.55 Relation between P_m of underwater pressure wave due to ANFO explosion and $W^{1/3}/R$ (Booster; No.3 kiri dynamite)

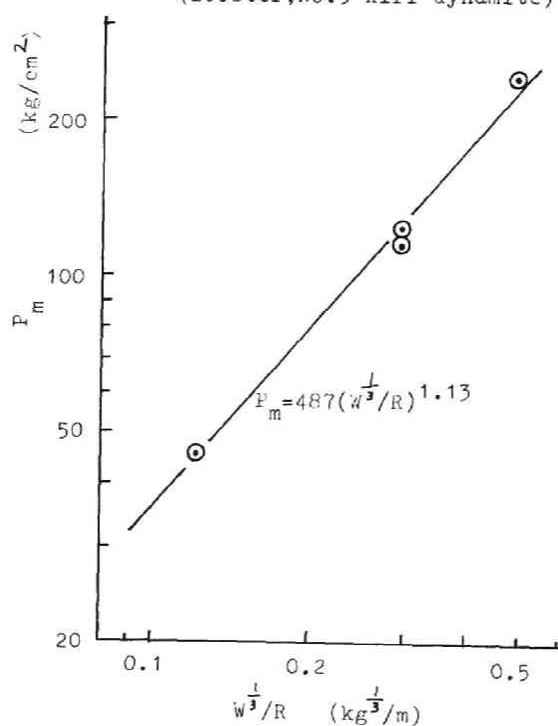


Fig.1.56 Relation between P_m of underwater pressure wave due to ANFO explosion and $W^{1/3}/R$. (Booster; Tetryl)

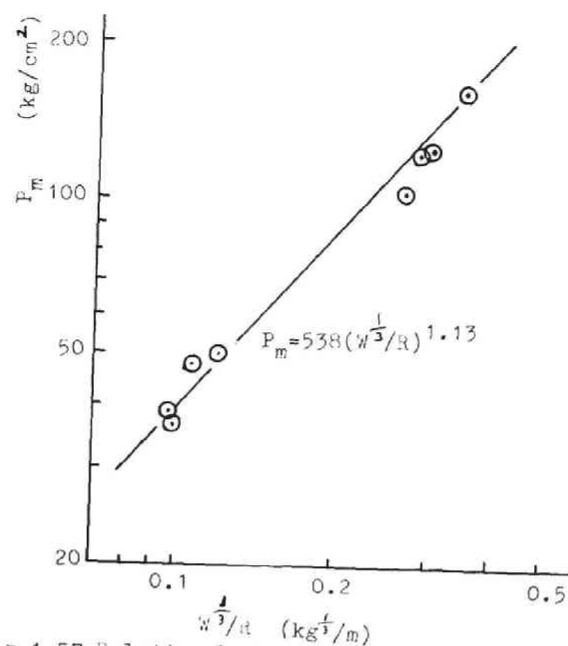


Fig.1.57 Relation between P_m of underwater pressure wave due to TNT explosion and $W^{1/3}/R$.

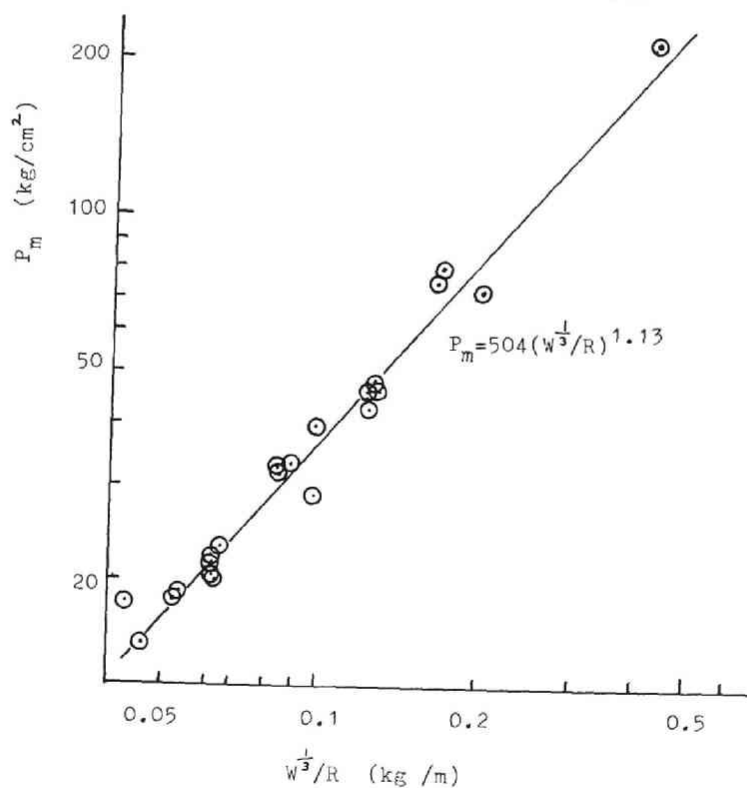


Fig.1.58 Relation between P_m of underwater pressure wave due to Shin kâri dynamite explosion and $W^{1/3}/R$.

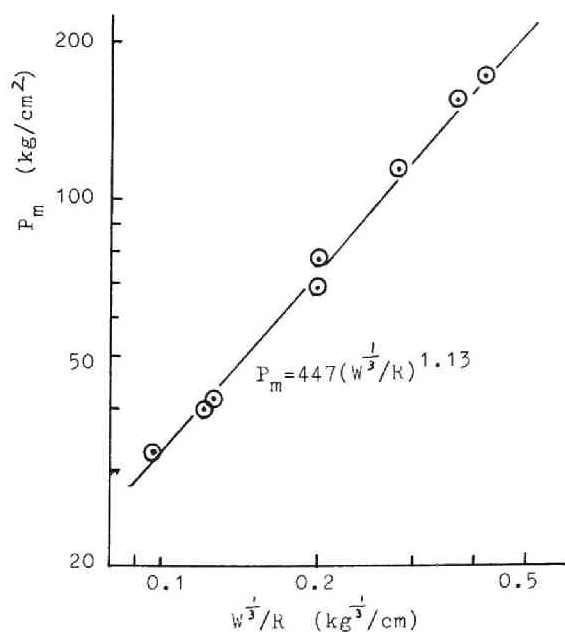


Fig.1.59 Relation between P_m of underwater pressure wave due to explosion of underwater explosive and $W^{1/3}/R$.

Table 1.11 Maximum pressure P_m and K of underwater pressure wave due to explosive explosion.

Explosive	Charge weight W (kg)	Distance from explosion source R (m)	Maximum pressure P_m (kg/cm ²)	K
ANFO (Booster: No.3 kiri dynamite)	1.12	2.5	160	423
	1.17	3.5	100	390
	1.16	3.5	104	406
	5.20	3.5	202	447
	1.16	10.6	33.6	458
	1.16	11.0	34.9	496
	1.16	4.0	85.4	387
	1.16	3.6	89.0	358
				Average 421
ANFO (Booster: Tetryl)	1.16	3.5	122	477
	1.16	8.7	45.0	490
	1.15	3.5	119	463
	5.20	3.5	234	518
				Average 487
Underwater explosive	1.00	3.5	113	464
	1.00	10.5	33.7	480
	1.00	8.0	41.0	430
	2.00	10.5	40.0	439
	5.00	8.5	72.3	446
	5.00	4.0	172	449
	5.00	8.5	69.1	423
	5.00	4.5	155	458
				Average 447
TNT	1.11	10.5	36.8	504
	1.11	3.5	126	499
	1.11	10.6	38.9	539
	1.11	3.6	125	509
	1.11	9.7	47.9	600
	1.11	3.0	162	538
	1.00	8.5	49.9	560
	1.00	3.7	126	552
				Average 538

Table 1.11 Continued

Explosive	W(kg)	R (m)	P _m (kg/cm ²)	K
Shin kiri dynamite	1.00	5.0	71.4	440
	5.00	10.4	74.8	575
	5.00	4.0	213.5	558
	7.00	11.0	78.0	563
	7.00	20.0	39.0	553
	7.00	23.0	32.0	532
	7.00	20.0	29.0	411
	5.00	27.3	21.9	501
	7.00	45.0	18.0	638
	5.00	32.4	18.7	519
	5.00	19.7	33.2	526
	5.00	26.7	22.6	504
	5.00	32.3	18.5	512
	5.00	37.6	15.1	496
	5.00	13.5	45.8	473
	5.00	27.4	22.0	506
	5.00	13.9	42.3	452
	5.00	26.9	19.8	446
	5.00	19.1	31.7	485
	5.00	27.0	21.2	479
	5.00	20.0	31.4	506
	5.00	26.9	21.0	473
	5.00	13.8	47.0	498
	5.00	27.3	21.4	490
	5.00	20.0	31.0	499
	5.00	13.6	48.0	500
	5.00	26.6	21.2	471
				Average 504

しては平均値を用い、薬種別に圧力最高値 P_m と $W^{\frac{1}{3}}/R$ との関係を示すと、以下に示す各式が得られる。

ブースターとして3号桐ダイナマイトを使った場合のANFO爆薬の場合：

$$P_m = 421 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.23)$$

ブースターにテトリルを使った場合のANFO爆薬の場合：

$$P_m = 487 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.24)$$

日本油脂製水中用爆薬の場合：

$$P_m = 447 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.25)$$

TNTの場合：

$$P_m = 538 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13} \dots\dots\dots (1.26)$$

新桐ダイナマイトの場合 :

$$P_m = 504 \left(\frac{W}{R} \right)^{\frac{1}{3}}^{1.13} \dots\dots\dots (1.27)$$

これらの結果によると、3号桐ダイナマイトで起爆した場合のANFO爆薬、日本油脂製水中用爆薬、テトリルで起爆した場合のANFO爆薬、新桐ダイナマイト、TNTの順に水中圧力波の圧力最高値が大きくなっている。しかしながら、その差は比較的少なく、それぞれの爆薬を用いた場合の測定値間にみられるばらつきの範囲とほぼ同程度であるとみなすことができる。一方、爆薬に接している水中には爆薬の爆轟圧に比例する大きさの波頭圧力をもつ水中圧力波が発生するはずである。そこで、ここでは日野ら¹²⁾によって与えられているつぎの(1.28)式に示す爆轟圧の計算式を用い、それぞれの供試爆薬が爆発したときの爆轟圧の大きさを求め、その結果をTable 1.12に示した。

Table 1.12 Detonation pressure of explosive and shock front pressure of underwater shock wave at the interface between explosive and water.

Explosive	Density of explosive (g/cm^3)	Detonation velocity D (m/S)	Detonation pressure P_D (kbar)	Shock front pressure P_W (kbar)
ANFO	0.8	3,500	29	33
Underwater explosive	1.6	7,000	210	148
TNT	1.6	6,900	200	141
Shin kiri dynamite	1.45	6,700	170	127

$$P_D = 0.000424 D^2 \Delta (1 - 0.543\Delta + 0.193\Delta^2) \dots\dots\dots (1.28)$$

ここに、 P_D : 爆轟圧 (m bar)

D : 爆速 (cm/S)

Δ : 爆薬の密度 (g/cm^3)

ただし、この計算に用いた爆速の値はTable 1.8に示した公称爆速の平均値である。しかし、爆薬の爆速はその形や薬量によってかなり異なるので、この実験時に実際に生じた爆薬の爆轟圧はTable 1.12に示した値とは若干異なっているものと考えられる。Table 1.12に明らかなように、TNTの爆轟圧はANFO爆薬のその約7倍となっているにもかかわらずTable 1.11に明らかなようにKの値はTNTとANFO爆薬とではほとんど差が見られないので、この理由について検討する。

まず，爆薬と水との界面に生ずる水中衝撃波の波頭圧力と爆轟圧との間には，近似的に（１．２９）式に示す関係が成立する^{13),14)}。

$$P_W = \frac{2\rho_W C_W}{\rho_W C_W + \Delta D} \cdot P_D \quad \text{..... (1.29)}$$

ここに， P_W ： 爆薬と水との界面上に生ずる水中衝撃波の波頭圧力

ρ_W ： 水の密度

C_W ： P_W の圧力値に対応する水中衝撃波の伝播速度

Δ ： 爆薬の密度

D ： 爆薬の爆速

そこで，水中衝撃波の波頭圧力とその圧力に対応する衝撃波伝播速度との関係については M.A. Cook らが求めた実測資料¹⁵⁾を，また爆薬の密度，爆速および爆轟圧の値にはそれぞれ Table 1.12 に示した値を用い，さらに水の密度を 1 g/cm^3 とし，（１．２９）式により爆薬と水の界面に生ずる水中衝撃波の波頭圧力を求め，その結果を Table 1.12 にあわせて示しておいた。Table 1.12 に示した爆轟圧の大きさと波頭圧力の大きさを対比して認められる大きな特徴は，密度も爆速もともに小さい ANFO 爆薬の場合には，界面に生ずる水中衝撃波の波頭圧力の方が爆轟圧よりも大きくなること，さらに密度も爆速も大きい爆薬では界面に生ずる水中圧力波の波頭圧力は爆轟圧よりも小さくなり，その低下の割合は爆轟圧の大きさの大きいものほど大きいということである。

つぎに，水中衝撃波の水中伝播特性から検討してみる。水中にある任意の点（測点）における水中衝撃波の波頭圧力を P_m ，爆源の中心から測点までの距離を R で表わすと，これらの間にはつぎの関係が成立する。

$$P_m = C \left(\frac{a_0}{R} \right)^\alpha \quad \text{..... (1.30)}$$

または

$$P_m = K \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha \quad \text{..... (1.31)}$$

ここに， P_m ： 任意の点（測点）における水中衝撃波の波頭圧力（ Kg/cm^2 ）

a_0 ： 爆源を球状装薬とした場合の爆薬の半径（ m ）

R ： 爆源の中心から測点までの距離（ m ）

W ： 薬量（ Kg ）

α ： 距離減衰指数

C, K ： 定数

これらの式において、 α の値は波頭圧力 P_m が充分小さい場合はほぼ 1.13 の値をとることはすでに述べた。しかし波頭圧力 P_m がきわめて大きい場合には α は異った値をとる。この点に関し、たとえば、KirkwoodらはKirkwood - Brinkley の理論を基礎に、密度 1.60 のペントライト、密度 1.59 の TNT および密度 1.00 のテトリルの3種類の爆薬について、生ずる水中衝撃波の波頭圧力と (R/a_0) との関係を求めている¹⁶⁾。そこでその結果を両対数方眼紙上に描きなおしてみると、Fig. 1.60 が得られる。図に明らかなように、距離減衰指数 α の値は (R/a_0) が小さく、波頭圧力が大きいほど大きくなっている。このように、 α の値が爆源からの距離により、また圧力値の大小により異った値をとり、しかも α の値に及ぼすこれらの因子の影響の度合が薬種によって異なる (Fig. 1.60 参照) ために、異なった爆薬の爆発により生

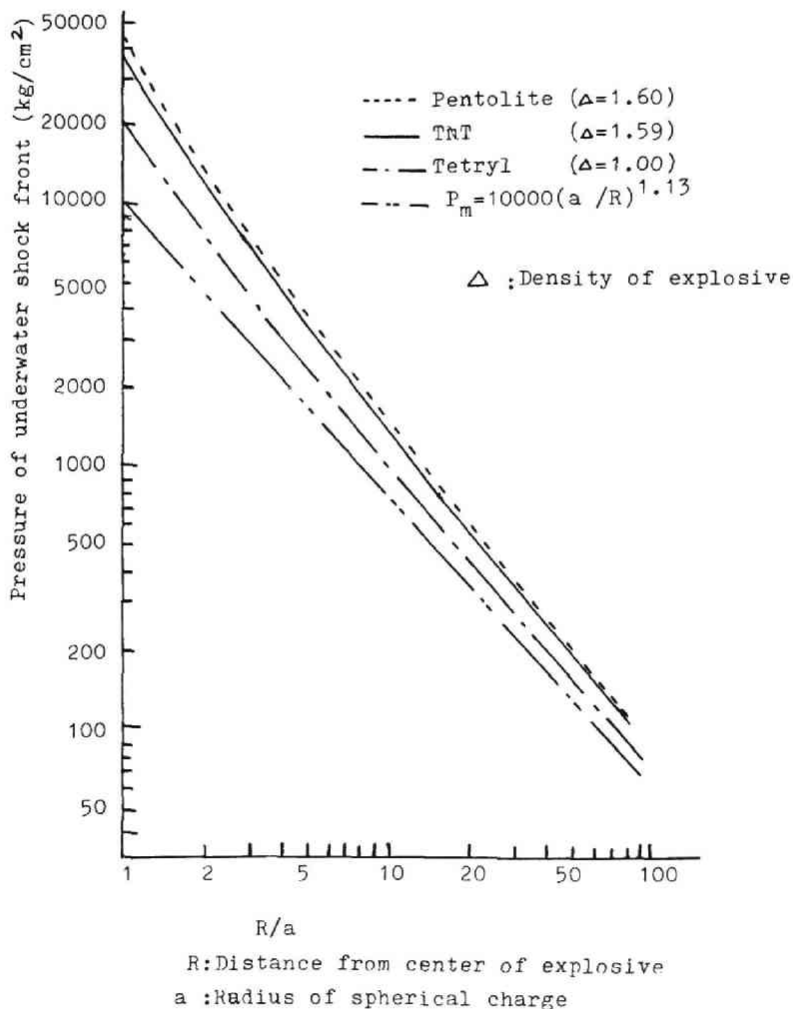


Fig.1.60 Relation between pressure P_{sf} of underwater shock front and distance from center of explosive

ずる水中衝撃波の波頭圧力値にもその影響が現われてくる。たとえば，Fig. 1.60 により，ペントライトとテトリルにより生ずる水中衝撃波について見てみると，大きな波頭圧力を生ずるペントライトの方が爆源近傍における α の値が大きいので，両者の爆発により爆薬と水との界面（ $R/a_0 = 1$ ）に生ずる水中衝撃波の波頭圧力の比の値はほぼ2であるのに対し， $R/a_0 = 100$ の距離においてはその比の値が1.25となり，この程度離れたところでは得られる波頭圧力の値がかなり接近してくることがわかる。このようなことは，当然今回の実験に用いた爆薬についても成り立っているものと考えられ，爆薬と水との界面における水中衝撃波の波頭圧力はTNTの方がANFO爆薬よりはるかに大きい，爆源近傍における α の値もTNTの方がANFO爆薬より大きいので，両者の水中衝撃波の波頭圧力は爆源から離れるに従い接近する。

最後に爆薬の密度の影響について検討する。（1.31）式を a_0 を使って書きかえると次式のようになる。

$$P_m = K \left\{ \left(\frac{\frac{4}{3} \Delta \pi (100 \cdot a_0)^3}{1000} \right)^{\frac{1}{3}} / R \right\}^{\alpha}$$

これを変形すると次式のようになる。

$$P_m = K \cdot \left\{ \left(\frac{4}{3} \pi \Delta \right)^{\frac{1}{3}} \times 10 \right\}^{\alpha} \left(\frac{a_0}{R} \right)^{\alpha}$$

この式と（1.30）式から定数 K と C との関係を求めると，

$$C = \left(\frac{4}{3} \pi \times 10^3 \right)^{\frac{\alpha}{3}} \cdot \Delta^{\frac{\alpha}{3}} \cdot K \quad \dots\dots\dots (1.32)$$

が得られる。前に述べたように α の値は爆源近傍では変化するが，ここでは簡単にするために α は1.13で一定であると仮定する。すると， C の値は爆薬と水との界面（ $R/a_0 = 1$ ）における水中衝撃波の波頭圧力を示すことになる。いま，爆薬AおよびBについて，それらの密度，定数 C ， K をそれぞれ Δ_A ， C_A ， K_A および Δ_B ， C_B ， K_B で表わすと，これらの間には次式に示す関係が成立する。

$$\frac{K_A}{K_B} = \left(\frac{\Delta_B}{\Delta_A} \right)^{\frac{1.13}{3}} \cdot \frac{C_A}{C_B} \quad \dots\dots\dots (1.33)$$

そこで，爆薬AはTNT，爆薬BはANFO爆薬と考えると，Table 1.12より $C_A/C_B = 4.27$ ，Table 1.8より $\Delta_B/\Delta_A = 0.5$ となり，これらを（1.33）式に代入すると， $K_A/K_B = 3.29$ となる。このように，たとえ α の値が一定の状態で減衰したとしても，爆薬と水との界面での水中衝撃波の波頭圧力の比が4.27であったものが， K の値の比に換算すると，爆薬の密度の影響で3.29となる。これに加えて前述の爆源近傍における α の値に差があるので，爆轟圧に大きな差があっても，水中圧力波の K の値の差は小さくなるものと考えられる。

一方、火薬衝撃の場合、Table 1. 10 に示すように、K の値は爆源の種類によってかなりの差が見られるが、これは爆源と水との界面における水中衝撃波の波頭圧力が爆薬衝撃の場合にくらべてはるかに小さいので、爆源近傍でも α の値がほとんど一定値 ($= 1.13$) で、爆源の種類による差がないためと考えられる。すなわち、爆源と水との界面における波頭圧力の比を (1.33) 式を使って換算したものがそのまま K の比として現われたものと考えられる。

第 1.5 節 結 言

本章においては、まず、本研究の全般に対して用いた水中圧力波の圧力測定方法について説明した。この測定法は、圧電型圧力計によって圧力を電気的な量に変換し、ブラウン管オシロスコープによって測定するという方法である。圧電型圧力計の圧電体にはチタン酸バリウム磁器および電気石の 2 種類を用いたが、これらの圧力計の特性について説明した。さらに、較正方法について述べ、この測定装置の特徴について説明した。

つぎに、水中において電気雷管、各種の火薬および爆薬が爆発した場合に生ずる水中圧力波を測定した結果にもとづいて、これらの水中圧力波の特徴を考察した結果について説明した。

まず、1～5 本の 6 号電気雷管が爆発した時、爆源から 20～100 cm 離れた位置で生ずる水中圧力波について以下のような特徴が認められた。すなわち、水中圧力波の到達によって圧力は急激に上昇し、数 μS から 10 μS 後には圧力が最高値に達する。その直後では (1.34) 式に示す関係をもって圧力は減衰していくが、圧力が圧力最高値の 1/2 程度まで減衰すると、その後は (1.34) 式で示される関係よりもゆるやかに減衰していく。

$$\frac{P}{P_m} = e^{-(t-\beta)/\theta} \quad (t \geq \beta) \quad \dots\dots\dots (1.34)$$

ここに、P : 水中圧力波の到達より t 秒後の圧力値

P_m : 圧力最高値

β : 定数 (数 $\mu S \sim 10 \mu S$)

θ : 定数 (約 10 μS)

一方、雷管衝撃により生ずる水中圧力波の圧力最高値 P_m (Kg/cm^2) と薬量 W (Kg) ならびに爆源からの距離 R (m) との関係は、(1.35) 式によって示すことができる。

雷管の軸方向 :	}	$P_m = 600 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.45}$
雷管の軸に対して 20° の方向 :		$P_m = 375 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$

雷管の軸に対して 40° の方向 : (1 . 3 5)

$$P_m = 344 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

雷管の軸に直角な方向 :

$$P_m = 385 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

このように、雷管の軸方向における指数 α の値のみが他の方向でのそれらにくらべて大きな値が得られたが、これは雷管の構造上、軸方向に高い圧力が生ずるためと、ノイマン効果の影響も加味されてくるためと考えられる。また、生ずる圧力の最高値は、爆薬衝撃の場合にくらべて小さく、爆薬衝撃の場合に生ずる最高圧のほぼ 7 割程度となる。これは、薬量が非常に少ないので、爆源近傍での熱拡散によるエネルギー損失が大きく影響してくるためと考えられる。

つぎに、各種の火薬の爆発によって生ずる水中圧力波の特性としては、以下のようなことがいえる。まず、この場合に生ずる水中圧力波の波形は、火薬の種類および装填容器の性質によって異なってくる。一般的に、火薬の爆発によって生ずる水中圧力波の圧力の立ち上がり時間は、火薬の形、大きさが同一であれば、火薬の威力が強いほど短かく、また、装填容器の強度の大きいほど短い。そしてこの立ち上がり時間は、爆薬衝撃により生ずる水中圧力波のそれにくらべて一般に長く、今回の実験においても、装填容器として強度の大きい鋼製容器を使った場合以外は、圧力の立ち上がり時間が爆薬衝撃により生ずる水中圧力波のその約 40 倍前後となっている。また、圧力最高値を過ぎてから後の圧力の減衰状態も、爆薬衝撃により生ずる水中圧力波のそれにくらべてゆるやかである。また、火薬の爆発によって生ずる水中圧力波の圧力最高値 P_m (Kg/cm^2) と薬量 W (Kg) ならびに爆源からの距離 R (m) との間には、今回の実験によれば (1 . 3 6) 式に示す関係が成り立つことが明らかとなった。

ポリエチレン容器入り獵用火薬の場合 :

$$P_m = 86.4 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

ブリキ製容器入り獵用火薬の場合 :

$$P_m = 77.2 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

ブリキ製容器入りけん銃用火薬の場合 :

$$P_m = 107 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

鋼製容器入りけん銃用火薬の場合 :

..... (1 . 3 6)

$$P_m = 205 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

(1.36) 式より明らかなように、火薬衝撃により生ずる水中圧力波の圧力最高値は、爆薬衝撃より生ずる水中圧力波の圧力最高値にくらべて数分の1前後となっているが、これは火薬の衝撃力が小さいことによるものである。

最後に、爆薬衝撃により生ずる水中圧力波の特性については、以下のことが明らかとなった。まず、この場合に生ずる水中圧力波の波形は雷管衝撃により生ずる水中圧力波のそれと類似しており、圧力波の到達により急激に圧力が上昇して最高値に達し、その後(1.37)式によって表わされる関係を保ちつつ減衰し、圧力値が圧力最高値の2分の1あるいは3分の1まで減衰すると、その後(1.37)式で示される関係よりもゆるやかに減衰するような波形となる。

$$\frac{P}{P_m} = e^{-(t-\beta)/\theta} \quad \dots\dots\dots (1.37)$$

$$\text{ここに, } \beta = 10 \sim 20 \mu S$$

$$\theta = 100 \sim 200 \mu S$$

また、(1.37)式における θ の値は、主として薬量および爆源からの距離によって決まるが、爆薬の種類によってもその値に若干の差が生じ、威力の強い爆薬ほど θ の値が小さくなる傾向が認められる。また、爆薬衝撃により生ずる水中圧力波の最高値については、今回の実測値においては薬種による顕著な差が認められなかったが、その理由について種々の面から考察した結果をも述べた。

参 考 文 献

- 1) たとえば, R.H.Cole : Underwater Explosion, Princeton University Press, (1948)
- 2) 佐々宏一 : 京都大学博士論文, P.19 (1962)
- 3) 田中一三 : 工業火薬協会誌, 26, P.361, (1965)
- 4) C.M.Harris, C.E.Crede : Shock and Vibration Handbook vol.1, McGraw-Hill Book Co., P.16~30. (1968)
- 5) A.H.Arons, R.H.Cole : The Review of Scientific Instrument, 21, 1, P.31, (1950)
- 6) R.H.Cole : Underwater Explosion, Princeton University Press, P.238. (1948)
- 7) 文献 6) P.239

- 8) 若 園 吉 一, 佐 藤 忠五郎 : 爆破, 鹿島出版会, P.28, (1970)
- 9) 文 献 6) P.250
- 10) 文 献 6) P.129
- 11) 文 献 6) P.126
- 12) K.Hino, T.Urakawa : 工業火薬協会誌, 17, P.242, (1956)
- 13) R.E.Duff, E.Houston : Journal of Chemical Physics, 23, P.1268
(1957)
- 14) W.E.Deal : Journal of Chemical Physics, 27, P.796 (1961)
- 15) 佐 々 宏 一, 伊 藤 一 郎 : 工業火薬協会誌, 27, P.228, (1966)
- 16) 文 献 6) P.123

第2章 無自由面の水中せん孔爆破に伴う水中圧力波

第2.1節 緒言

水中爆破を施工する場合、これに伴う水中圧力波について十分な検討をしておくことが必要である。水中爆発に起因する水中圧力波に関しては理論的にも実験的にも十分な検討がなされており、それらの結果が系統的にまとめられている¹⁾。そのため、水中爆破においてもこの結果を適用されることが多い。ところが、水中せん孔爆破と水中爆発では水中圧力波の発生メカニズムが異なるので、前者により生ずる圧力波についてもその発生メカニズムや伝播特性等を明らかにする必要がある。

水底にある堆積土の下に岩盤を掘削する工法として、堆積土を残した状態で、せん孔、装薬して爆破する工法（Overburden blasting method）がある²⁾。この場合には無自由面爆破となる。このような爆破に伴って生ずる水中圧力波は地盤中を伝播してきた弾性波が水中へ透過することにより生ずる。弾性波には、爆源からの直接波（P波、S波）、反射波（P波、S波）および表面波があり、これらが相互に作用し合って、複雑な波動が形成される。本章では直接P波が透過して生ずる水中圧力波に着目し、水槽実験によって、この波動の特性について検討したので報告する。

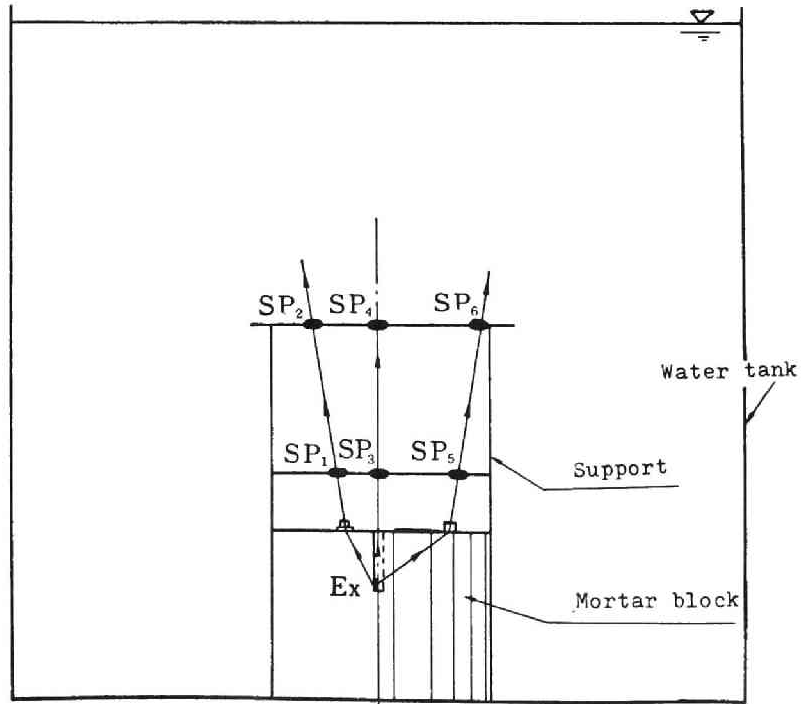


Fig.2.1 Test apparatus

Ex :Explosion source
SP :Pressure gauge
→ :Propagation path of wave

第2.2節 実験方法

実験水槽（ $3\text{m} \times 5\text{m} \times 3.5\text{m}$ ）内に設置したモルタルブロックを爆破対象岩のモデルとし、Fig. 2.1に示すように圧力計を配置して、水中圧力波の測定を行なった。モルタルブロックは、水、セメントおよび砂を1:2:4の割合で配合し、1カ月以上養生したもので、弾性縦波速度は $3,000\text{m/S}$ 、弾性横波速度は $1,900\text{m/S}$ 、密度は 1.85g/cm^3 のものである。また、このブロックの直径は 120cm 、高さは 80cm の円柱型である。

爆源には、Fig. 2.2に示すように、円柱型に圧填したテトリルペレット（密度 1.50g/cm^3 、薬量 10g ）を用いた。モルタルブロックの上面から、その面に垂直に直径 22mm の装薬孔をせん孔し、爆薬を所定の位置に装填し、タンピングには急結モルタルを用いた。

圧力ピックアップには電気石ゲージを用い、これらをモルタルブロックの上部に組み立てた枠組の所定の位置に固定した。圧力

ピックアップはFig. 2.1に示すように、モルタル中に生ずる弾性縦波が音響理論に従って水中へ透過し、伝播するものとして、波動の入射角が 0° 、 30° および 60° となる伝播経路上にそれぞれ2個ずつ配置した。ピックアップが受感した信号はインピーダンス変換増幅器を通してトランジェントレコーダ（Biomation 802）に記憶させ、X-Yレコーダに記録した。

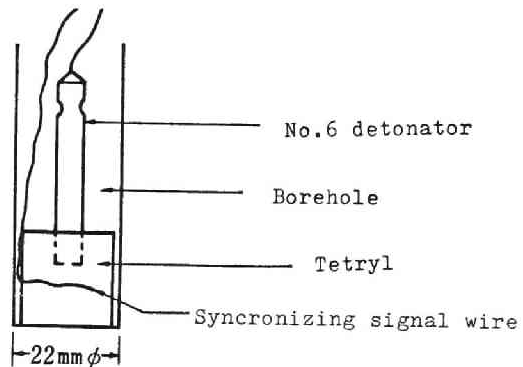


Fig. 2.2 Press tetryl for explosion source.

第2.3節 実験結果および考察

2.3.1 圧力波の伝播経路

最小抵抗線長 L が 10cm 以上では漏斗孔が生じないので、今回は L を $10\text{cm} \sim 31\text{cm}$ として漏斗孔の生じない場合の水中圧力波について検討した。

Fig. 2.3には圧力波形例を示した。記録の掃引開始点は爆源として使用したテトリルに巻いた導線が切断した時間であるから、この時刻から擾乱開始までの時間は波動がそれぞれの測点まで伝播する時間とほぼ等しいと考えられる。そこで、このことを考慮して、初動の伝播経路が音響理論に従ったものであるか否かについて検討する。

Fig. 2.4は音響理論による伝播経路を示したものである。ここで、 $O-C$ 間、 $O-SP_I$ 間、

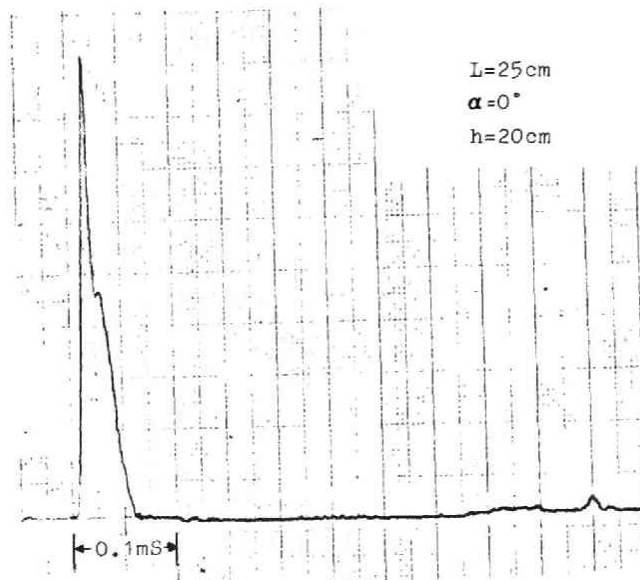
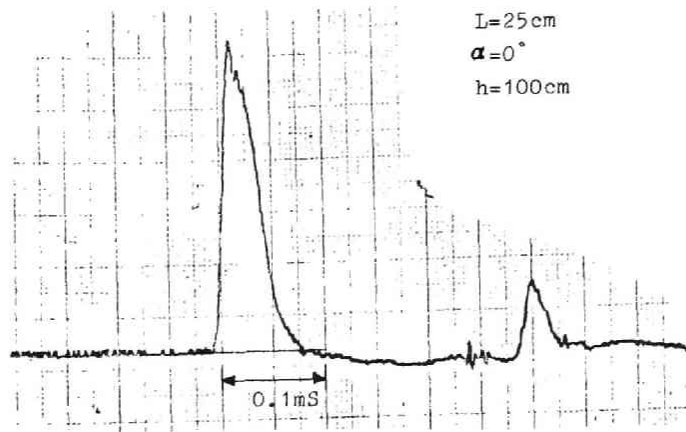


Fig.2.3 Examples of pressure wave form.

L :Length of line of the least resistance

α :Incident angle

h :Distance of pressure gauge from the surface of mortar

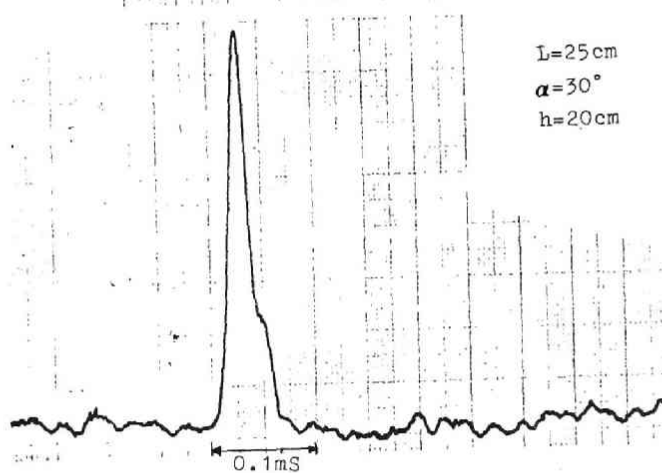
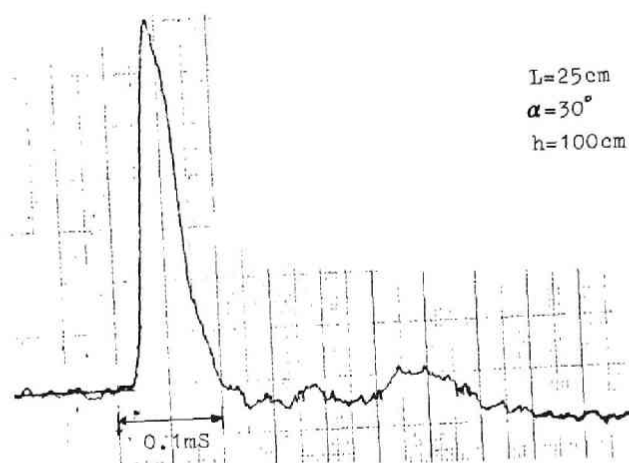


Fig.2.3 Continued

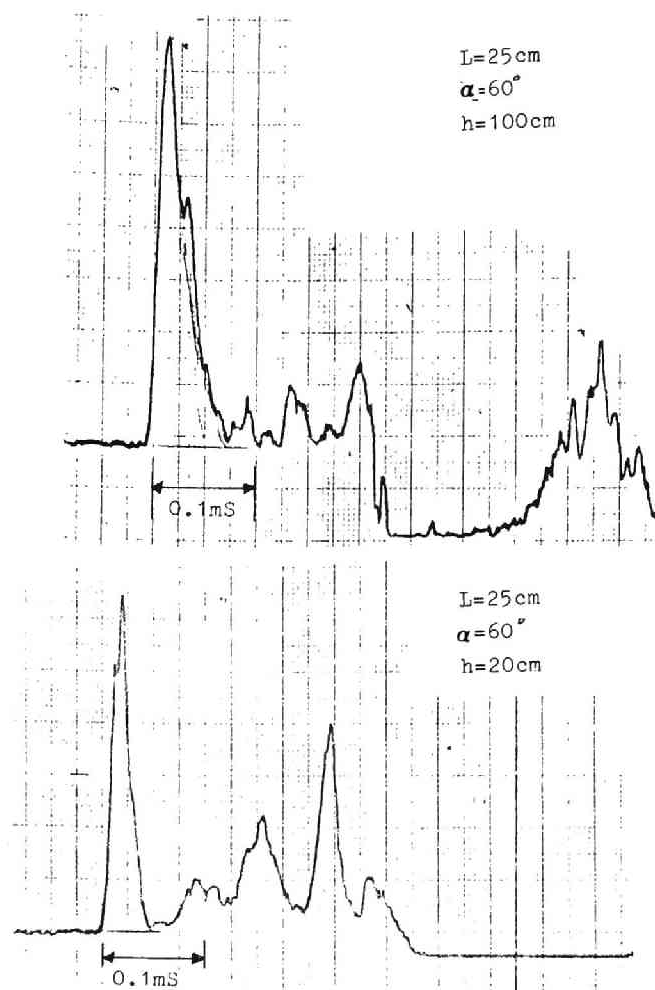


Fig.2.3 Continued.

O-SP_{II} 間の波動の伝播時間をそれぞれ tR_M , tR_1 , tR_2 とする。SP_I 点, SP_{II} 点における測定記録について掃引開始時刻から擾乱開始までの時間を求め、これらをそれぞれ tR'_1 , tR'_2 とすると、次式が成り立つ。

$$tR_1 = tR'_1 + t_c, \quad tR_2 = tR'_2 + t_c \quad \cdots (2.1)$$

ここで、 t_c は爆発の瞬間から導線が切断するまでの遅れ時間である。

これより、SP_I-SP_{II} 間の波動の伝播速度 W. V. は次式によって与えられる。

$$W.V. = \frac{R_{W2} - R_{W1}}{tR_2 - tR_1} = \frac{R_{W2} - R_{W1}}{tR'_2 - tR'_1} \quad \cdots (2.2)$$

tR'_1 , tR'_2 の実測値を(2.2)式に代入して得られるW.V.の平均値は1.430m/S, 標準偏差は37m/Sであった。この値は水中音波の伝播速度と一致しており、この波動が SP_I から SP_{II} に向って伝播しているという仮定に矛盾しない。一方、 tR_M は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} tR_M - tC \\ &= tR'_2 - \frac{R_{W2}}{W.V.} \\ &= tR'_1 - \frac{R_{W1}}{W.V.} = tR'_M \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 tR'_M は導線が切断してから波動がC点に達するまでの時間である。

一方、実験結果について tR'_M と R_M との関係を求め、その結果をFig. 2.5に示した。さらに最小自乗法を用いてこの関係を整理すると、次式が得られる。

$$R_M = 305 tR'_M + 10.2 \quad \text{-----} (2.4)$$

(R_M : cm, tR'_M : mS)

(2.4)式における係数(305cm/mS = 3050m/S)はモルタル中の波動の伝播速度を示すが、この値はこの実験に用いたモルタル中での弾性縦波の速度とほぼ一致している。以上に述べた検討の結果、水中圧力波の初動はモルタル内を伝播してきた弾性縦波が音響理論に従って水中に透過したものであることがわかる。

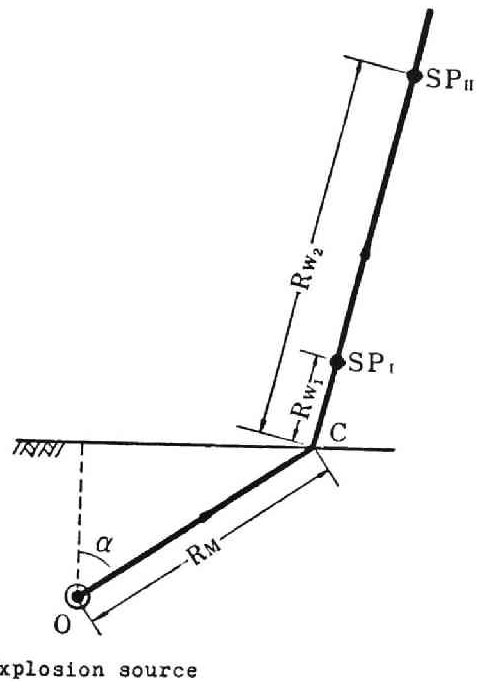


Fig.2.4 Propagation path of pressure wave.

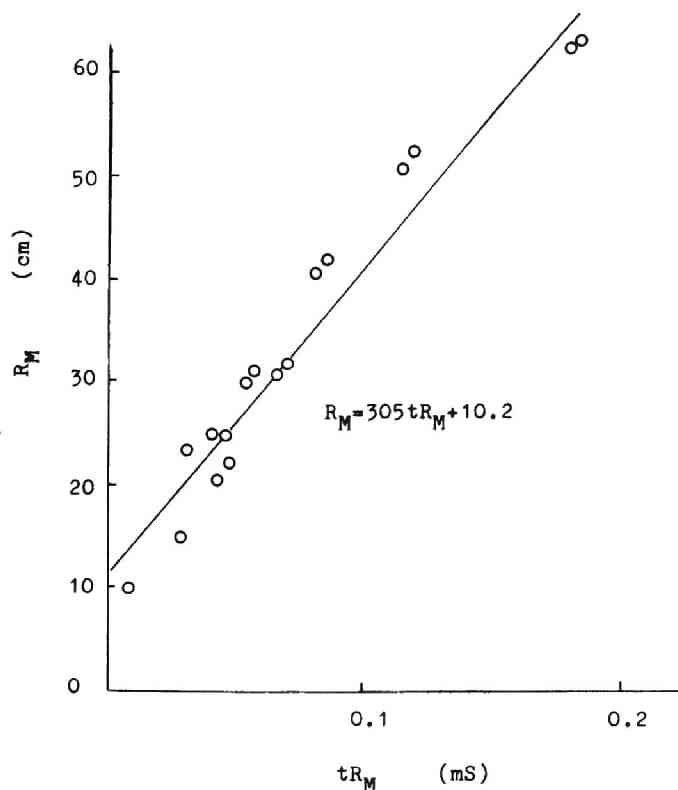


Fig.2.5 Relation between R_M and tR_M .

R_M :Distance between Q and G

tR_M :Time between trigger signal and
arrival time of pressure wave

2.3.2 圧力波形の特徴と圧力の距離減衰

今回の実験では入射角が 0° , 30° および 60° の場合についての波動を測定したが、このように入射角が大きくない時は、Fig. 2.3 から明らかなように、初動のパルスの圧力が最も大きいことがわかる。

初動のパルスの立ち上がり時間（擾乱が始まってからピーク圧に達するまでの時間） T_1 の値をTable 2.1に、パルス幅 T_2 の値をTable 2.2に示す。また、Fig. 2.6に入射角が 0° の場合について、立ち上がり時間 T_1 と最小抵抗線長 L ならびにモルタル面からの垂直距離 h との関係を示した。この結果、パルス幅は L あるいは h の値が変化してもほぼ一定であるが、立ち上がり時間は L が大きい程、また h が小さい程大きい傾向が見られる。このことは、立ち上がり時間はモルタル中の伝播距離が長くなるにつれて長くなるが、水中の伝播距離が長くなると短くなることを示している。この点について簡単に定性的な考察を行なってみる。圧力波や応力波が強

Table 2.1 Rise time of the first pressure pulse.
(Unit: μS)

α h(cm) L(cm)	0°			30°			60°		
	0	20	100	20	100	20	100	20	100
10.0	-	18	13	40	45	50	25	-	-
11.5	-	17	15	-	-	40	38	-	-
15.0	-	24	18	42	42	-	-	-	-
20.0	-	25	20	42	38	46	35	-	-
25.0	-	28	20	38	35	46	40	-	-
30.0	-	30	22	-	-	-	-	-	-
31.0	31	-	25	42	40	-	-	-	-

Table 2.2 Pulse width

(Unit: μS)

α h(cm) L(cm)	0°			30°			60°		
	0	20	100	20	100	20	100	20	100
10.0	-	65	60	80	86	120	120	-	-
11.5	-	80	90	-	-	90	120	-	-
15.0	-	75	60	100	110	100	100	-	-
20.0	-	80	75	95	100	90	110	-	-
25.0	-	80	80	85	70	-	-	-	-
30.0	-	75	80	-	-	-	-	-	-
31.0	80	-	60	130	130	-	-	-	-

Note

α : Incident angle

h: Height of a gauge from the top of a mortar block

L: Length of line of the least resistance

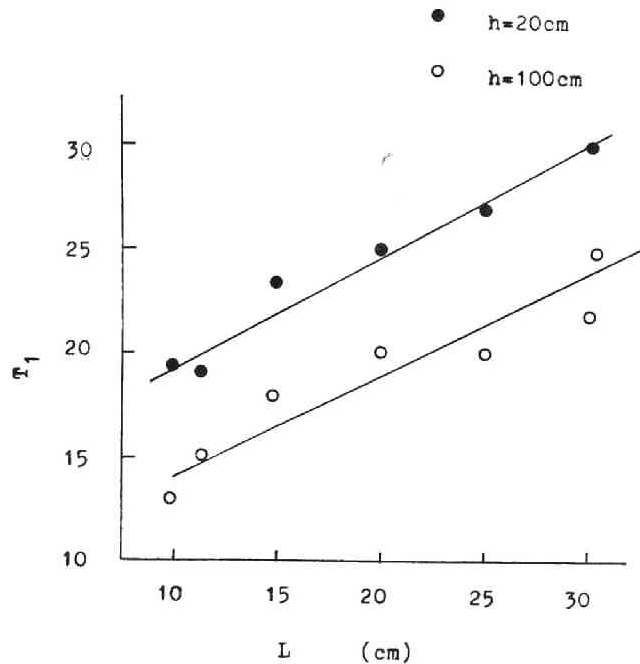


Fig.2.6 Relation between T_1 and R_M

T_1 : Rise time

大な時、その伝播速度は圧力（あるいは応力）の値が大きい程大きい。そのため、波動が進行するにつれて立ち上り時間は短かくなろうとする。衝撃波ではその性質が強くあらわれている。一方、媒質は粘性をもっているため、波動の伝播中にエネルギーロスが生ずるが、このロスの

The figure consists of two parts. The left part is a "Cross section" diagram showing a vertical axis with points \$O_\theta\$, \$O_\phi\$, \$0\$, and \$H\$ from bottom to top. A horizontal line passes through \$H\$. A curved line labeled "Wave front" intersects a straight line at point \$SP\$. Point \$C\$ is located between \$O_\phi\$ and \$H\$. Distances are indicated as \$L\$ between \$0\$ and \$H\$, \$\alpha\$ between \$O_\phi\$ and \$0\$, \$R_\phi\$ between \$O_\phi\$ and \$C\$, and \$R_w\$ between \$C\$ and \$SP\$. Angles \$\theta\$ and \$\phi\$ are shown relative to the vertical axis. The right part is a "Plan" view showing a circle centered at the origin of a coordinate system. Point \$SP\$ is on the circle's circumference. An arrow indicates the "\$\phi\$ direction" tangent to the circle at \$SP\$.

Fig. 2.7 において、爆源 O から伝播してきた球面波が水中へ透過して生じた波動の波面の曲率は方向によって異なる。たとえば、O, H を通り紙面に平行な平面と波面と交わる曲線の曲率半径 $R\theta'$ (θ 方向の曲率半径)、C, SP を通り紙面に垂直な平面と波面と交わる曲線の曲率半径を $R\phi'$ (ϕ 方向の曲率半径) とすると、図に示す経路すなわち O - C - SP を通る波動については $R\theta = R\theta' - R_W$ および $R\phi = R\phi' - R_W$ はそれぞれ次式によって与えられる。

ここに、 α : 入射角、 n : 屈折率、 L : \overline{OH} の長さ

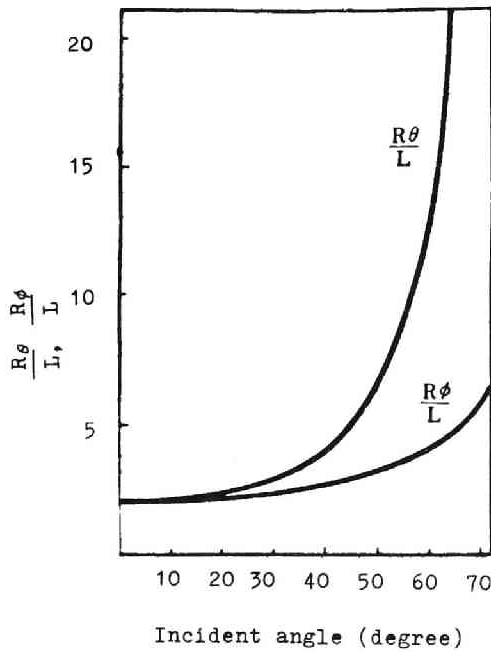


Fig.2.8 Relation between R_θ/L or R_ϕ/L and incident angle.

R_θ, R_ϕ : Radius of curvature

$$\left. \begin{aligned} r_\theta &= \frac{\ln P_{II} - \ln P_I}{\ln(R_\theta + R_{W1}) - \ln(R_\theta + R_{W2})} \\ r_\phi &= \frac{\ln P_{II} - \ln P_I}{\ln(R_\phi + R_{W1}) - \ln(R_\phi + R_{W2})} \end{aligned} \right\} \dots (2.6)$$

ここに、 r_θ : O_θ を仮想波源とした時の距離減衰指数

r_ϕ : O_ϕ を仮想源とした時の距離減衰指数

P_{II} : SP II 点における圧力値

P_I : SP I 点における圧力値

なお、距離減衰指数は仮想波源からの距離が R である点における圧力値を P として、

$P = P_0 (1/R)^r$ なる式が成立した時の r の値である。ただし、 P_0 は $R = 1$ での圧力値を示す。

実験結果より求めた距離減衰指数 r と L との関係を図 2.9 に示す。図 2.9 に示す点線は $r = 1.13$ を表すが、この値は球面波の場合の距離減衰指数である。³⁾ $\alpha = 0^\circ$ では、圧力波面は球面となるので、 $r_\theta = r_\phi$ となり、その値はほぼ 1.13 に等しい。 $\alpha = 30^\circ$ の時の r_θ と r_ϕ の値はばらつきが大きい、平均的にみればそれらの値にあまり差がなく、ほぼ 1.13 に等しいとみなせる。 $\alpha = 60^\circ$ になると r_θ と r_ϕ の差が大きくなり、 r_ϕ の値が 1.13 に近い値を示す。

R_θ および R_ϕ は入射角 α の関数であるから、 R_θ/L あるいは R_ϕ/L と α の関係を示すと、Fig. 2.8 のようになる。

今回の実験では、Fig. 2.4 に示すように、波動の伝播経路上の 2 点に圧力計を設置したが、これらの 2 点での圧力測定結果より、波動の伝播経路上における圧力の距離減衰を求めることができる。ここで、波面 θ 方向ならびに ϕ 方向の曲率の中心をそれぞれ O_θ および O_ϕ とし、これらの点を仮想波源とした時の距離減衰指数は次式によって与えられる。

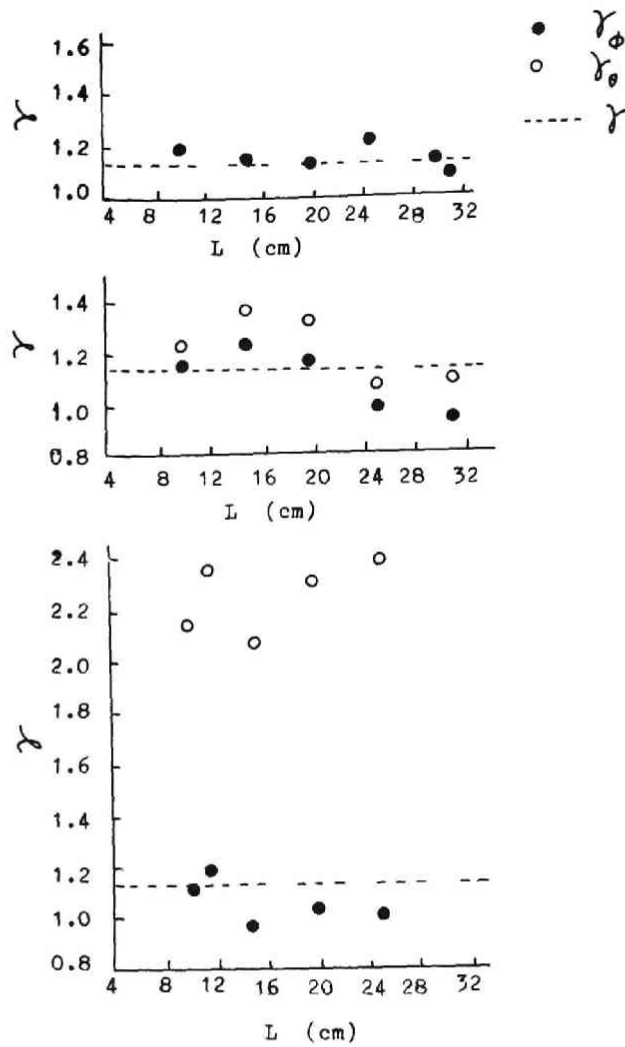


Fig.2.9 Relation between γ and L

2.3.3 透過圧力値

R_θ, r_θ ならびに R_ϕ, r_ϕ を使って、水との境界面上の点Cにおける水中圧力波の圧力値 P_C を(2.7)式によって求め、これとモルタル中の波動の伝播距離 R_M との関係をFig. 2.10に示した。

O_ϕ を仮想波源とした場合：

$$P_C = P_I \left(\frac{R_\phi + R_{W1}}{R_\phi} \right) r_\phi = P_{II} \left(\frac{R_\phi + R_{W2}}{R_\phi} \right) r_\phi \quad \left. \vphantom{P_C} \right\} \text{---- (2.7)}$$

0_θ を仮想波源とした場合：

$$P_C = P_I \left(\frac{R_\theta + R_{W1}}{R_\theta} \right) r_\theta = P_{II} \left(\frac{R_\theta + R_{W2}}{R_\theta} \right) r_\theta$$

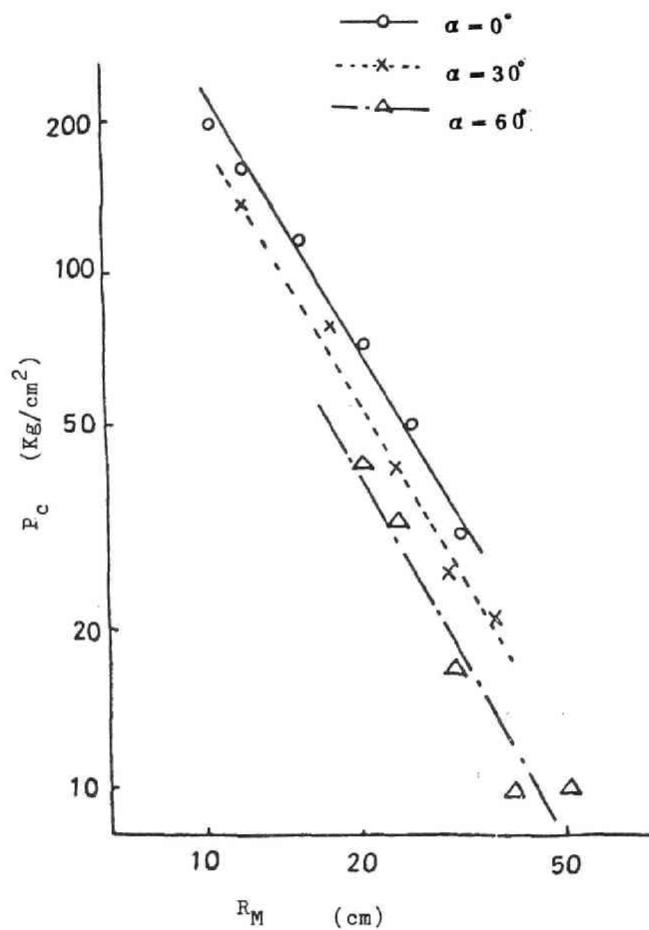


Fig.2.10(1) Relation between P_C and R_M .

(Imaginary wave source : 0_ϕ point)

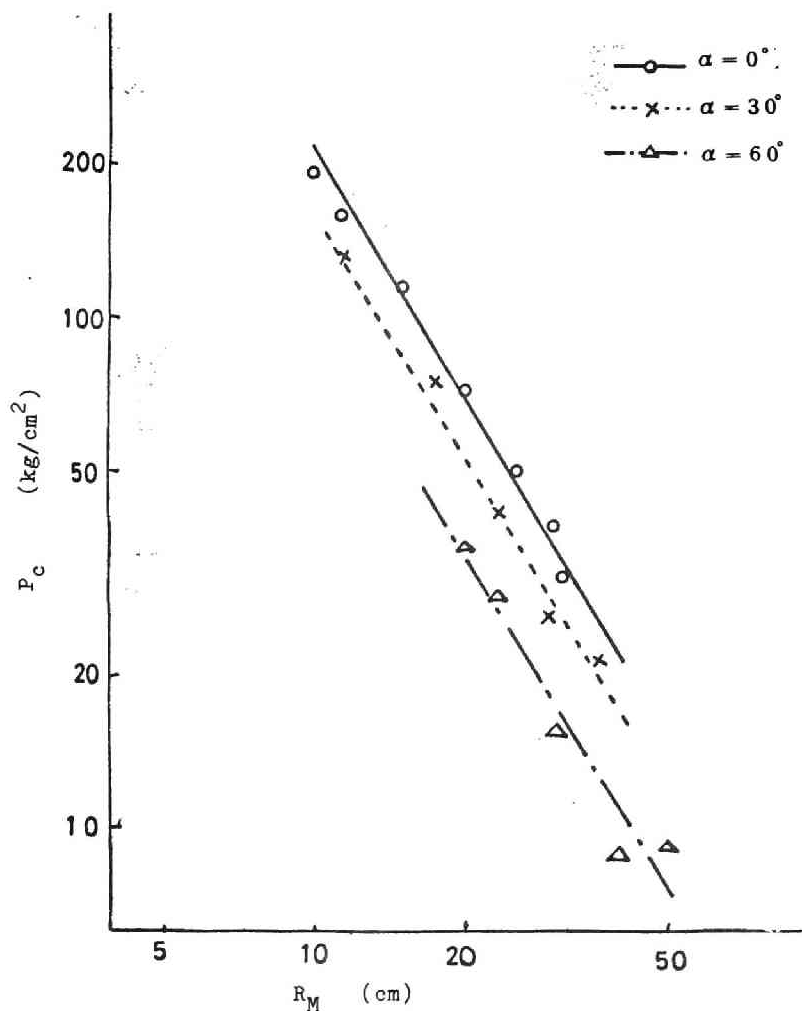


Fig.2.10(2) Relation between P_C and R_M .
(Imaginary wave source: O_θ point)

Fig. 2.10 に示した関係を最小自乗法により整理すると、それぞれ次式が得られる。

O_θ を仮想波源とした場合：

$$\begin{aligned}
 P_C &= 1.00 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 0^\circ) \\
 P_C &= 8.32 \times 10^3 \times R_M^{-1.682} & (\alpha = 30^\circ) \\
 P_C &= 7.65 \times 10^3 \times R_M^{-1.759} & (\alpha = 60^\circ)
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} P_C &= 1.00 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} \\ P_C &= 8.32 \times 10^3 \times R_M^{-1.682} \\ P_C &= 7.65 \times 10^3 \times R_M^{-1.759} \end{aligned}} \right\} \dots (2.8)$$

O_θ を仮想波源とした場合：

$$\left. \begin{aligned} P_c &= 1.0.0 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 0^\circ) \\ P_c &= 6.8.3 \times 10^3 \times R_M^{-1.625} & (\alpha = 30^\circ) \\ P_c &= 4.4.0 \times 10^3 \times R_M^{-1.625} & (\alpha = 60^\circ) \end{aligned} \right\}$$

これらの式において、 P_c および R_M の単位はそれぞれ kg/cm^2 および cm である。

この結果、 R_M の指数はほぼ一致しており、ばらつきは測定誤差によるものと見なされる。

そこで、指数を -1.658 に揃えて再整理すると、(2.9)式が得られる。

O_ϕ を仮想波源とした場合：

$$\left. \begin{aligned} P_c &= 1.0.0 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 0^\circ) \\ P_c &= 7.7.7 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 30^\circ) \\ P_c &= 5.4.5 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 60^\circ) \end{aligned} \right\}$$

O_θ を仮想波源とした場合：

$$\left. \begin{aligned} P_c &= 1.0.0 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 0^\circ) \\ P_c &= 7.5.4 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 30^\circ) \\ P_c &= 4.9.8 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} & (\alpha = 60^\circ) \end{aligned} \right\}$$

---(2.9)

これより、入射角 α が大きくなるに従って R_M の係数は小さくなるのがわかるが、これはモルタル中から水中へ波動が透過する時の透過率が α に依存していることによるものと考えられるので、この点について検討してみる。弾性体と考えているモルタル内を伝播してきた応力波が水との境界面に達すると、水中への透過波とモルタル内へ戻る反射縦波および反射横波を生じこの際の透過波と入射波の圧力振幅の比を透過率と呼ぶ。ここで、境界面に垂直な方向の両媒質の変位は等しく、境界面に作用する両媒質の直応力も等しく、かつ境界面に作用するせん断応力は零であるという境界条件を与えて、弾性理論より透過率 $E_p(\alpha)$ を誘導すると、(2.10)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{E_p(\alpha)} &= \frac{\rho_M}{2\rho_W} \left\{ \left(1 - \frac{2}{M_1^2} \sin^2 \alpha\right) \sqrt{\frac{M_2^2 - \sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \alpha}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\frac{4 \sin^2 \alpha}{M_1^2} \sqrt{(M_1^2 - \sin^2 \alpha)(M_2^2 - \sin^2 \alpha)} + \frac{\rho_W}{\rho_M} M_1^2}{M_1^2 - 2 \sin^2 \alpha} \right\} \\ M_1 &= \frac{C_{LM}}{C_{TM}}, \quad M_2 = \frac{C_{LM}}{C_{LW}} \end{aligned} \right\} \text{---(2.10)}$$

ここに、 ρ_W ：水の密度

ρ_M ：モルタルの密度

C_{LM} ：モルタル中での弾性縦波の伝播速度

C_{TM} ：モルタル中での弾性横波の伝播速度

C_{LW} ：水中での音速

(2.1.0)式にそれぞれ $\rho_W = 1.0 \text{ g/cm}^3$, $\rho_M = 1.85 \text{ g/cm}^3$, $C_{LM} = 3,000 \text{ m/S}$, $C_{TM} = 1,900 \text{ m/S}$ および $C_{LW} = 1,430 \text{ m/S}$ の値を代入して $Ep(\alpha)$ の値を求めると、 $Ep(0^\circ) = 0.422$, $Ep(30^\circ) = 0.352$, $Ep(60^\circ) = 0.189$ となる。モルタルと水との境界面上で爆源直上の点Hに入射する弾性縦波の σ_r (爆源を中心とした球面波の直応力成分) の正のピーク値を σ_M とすると、この点における水中圧力波の大きさ P_c は $\sigma_M \times Ep(0^\circ)$ となる。この P_c の値は(2.9)式の $\alpha = 0^\circ$ の場合に得られる値に相当するので、 σ_M は次式によって与えられることになる。

$$\sigma_M = \frac{P_c(\alpha=0^\circ)}{Ep(0^\circ)} = 2.37 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} \quad \text{--- (2.1.1)}$$

(2.1.1)式は無限のモルタル中でテトリル10gが爆発して生ずる弾性縦波の伝播式でもある。すなわち、爆源から R_M の距離での弾性縦波の σ_r の正のピーク値は σ_M となる。そこで、 $\alpha = 30^\circ$ および 60° における界面Cでの透過波の圧力 P_c はそれぞれ $\sigma_M \times Ep(30^\circ)$ および $\sigma_M \times Ep(60^\circ)$ となり、これらの値はそれぞれ次式によって与えられる。

$\alpha = 30^\circ$ の時：

$$P_c = 8.34 \times 10^3 \times R_M^{-1.658}$$

$\alpha = 60^\circ$ の時：

$$P_c = 4.48 \times 10^3 \times R_M^{-1.658}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 30^\circ \text{ の時：} \\ P_c = 8.34 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} \\ \alpha = 60^\circ \text{ の時：} \\ P_c = 4.48 \times 10^3 \times R_M^{-1.658} \end{array} \right\} \text{--- (2.1.2)}$$

(2.1.2)式と(2.9)式を比較するとほぼ一致しているが、このことは(2.9)式での係数の相違が透過率の差異によることを裏付けている。

このように、モルタル中を伝播してきた直接P波が水中に透過して生ずる水中圧力波は、 α が大きくなるにつれて急激に減衰する。そのため、今回の実験での測点のように、 α があまり大きくない領域では直接P波の透過により生じた圧力波が卓越するが、 α が大きくなるとこの波動が減衰して小さくなるので、表面波、底層からの反射波、屈折波などの波動によって生ずる圧力波が卓越するようになるものと考えられる。

直接P波による圧力波が卓越する領域での水中圧力波のピーク圧 P_s は、近似的に次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} P_s &= P_c \left(\frac{R_o'}{R_s'} \right)^r \\ P_c &= \sigma_c \cdot E_p(\alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.13)$$

(2.13)式において、 R_o' 、 R_s' はそれぞれ波面の曲率の中心から界面上のC点までの距離および測点までの距離であり、 σ_c はC点での入射応力波の応力最高値である。ただし、波面は球面波ではないので、曲率の中心は方向によって異なるが、今回の実験の結果によれば、曲率の中心をOとすれば、 r の値はほぼ1.13となる。

第2.4節 結 言

本章では、水底で無自由面せん孔爆破を行なった場合に生ずる水中圧力波について、爆破対象物としてモルタルを用いた基礎実験を行ない、モルタル中を伝播してきた直接P波が水中へ透過して生ずる圧力波について検討を行なった。その結果、次の点が明らかになった。

- (1) 今回の実験では、モルタルと水との界面へ入射する直接P波が入射角 60° 以内で入射する場合について、水中へ透過して生じた波動の伝播経路上での水中圧力波について検討したがこの領域での水中圧力波は、このP波の透過により生じた波動が主体となっていることが確認された。
- (2) 圧力波の波面は球面ではないので、波面の曲率の中心は方向により異なり一定でないが、直接P波の透過により生じる波動の伝播経路に沿った方向での圧力は ϕ 方向の曲率の中心からの距離のほぼ1.13乗に反比例するので、この関係を用いて圧力の近似値を推算することができる。
- (3) 水中圧力波の立ち上り時間は、今回の実験の範囲内では、爆源からモルタルと水との界面までの距離が長くなるにつれて大きくなり、測点が界面から離れる程短くなる傾向が認められた。

参 考 文 献

- 1) たとえば、R.H.Cole:Underwater Explosion, Princeton University Press (1948)
- 2) 本州四国連絡橋公団:南北備讃瀬戸掘削試験工事報告書,(1975)
- 3) R.H.Cole:Underwater Explosion, Princeton University Press, P.242 (1948)

第3章 一自由面の水中せん孔爆破に伴う水中圧力波

第3.1節 緒 言

水中爆破においても、一自由面爆破では漏斗孔が生ずるので、この部分の岩盤は破壊されて弾性体ではなくなる。さらに、漏斗孔から爆発生成ガスや破壊された岩塊が噴出する。これらが第2章で検討した無自由面爆破の場合とは異なる点である。そのため、漏斗孔の生成が圧力波に与える影響について検討する必要がある。本章では、水槽内に設置したモルタルブロックを使って一自由面爆破の模型実験を行ない、生ずる水中圧力波の特性について検討した。

第3.2節 実験方法

Table 3.1 Mortar block

実験には、Table 3.1 に示す2種類のモルタルブロックを使用した。Aモルタルブロックは第2章に述べた実験で使用したのと同じであり、

	Mixing proportion W:C:S*	Height (m)	Diameter (m)
A Mortar	1:2:4	0.8	1.3
B Mortar	1:3:6	0.4	2.0

*W:Water, C:Cement, S:Sand

無自由面爆破の場合との比較のデータを得る目的に供した。Bモルタルブロックは一自由面爆破の実験用につくったものである。一自由面爆破では抵抗線長が短かいので厚さを薄くすることができ、その分だけ直径を大きくしてある。なお、Bブロックの弾性縦波速度は $2,700 \text{ m/S}$ 、弾性横波速度は $1,850 \text{ m/S}$ 、密度は 2.0 g/cm^3 である。

モルタルブロックの上面から垂直下向きに孔径 22 mm の装薬孔をせん孔し、この中にテトリルベレット（薬量 10 g 、密度 1.5 g/cm^3 ）を装填し、急結モルタルで填塞した。

一自由面爆破によって生ずる水中圧力波は、地盤中を伝播してきた弾性波が水中へ透過して生ずるものと、爆発生成ガスや破壊された岩塊が漏斗孔より噴出する時に生成したものが合成されたものと考えられる。本論文では、前者を地盤-水圧力波、後者をガス圧力波と呼び、この両者に分けて検討することにする。地盤-水圧力波を抑制した圧力波を得るためには、Fig. 3.1 に示すようなモルタルブロックを使用した。このブロックでは、地盤-水圧力波は、発泡スチロールによってさえぎられるが、ガス圧力波は、その伝播経路と考えられる部分には発泡スチロールがないので抑制されずに伝播する。Table 3.2 には使用した発泡スチロールの物性を示した。また、Fig. 3.2 は発泡スチロールの圧力軽減率を示したもので、 10 g のテトリルを水中で爆発させ、爆源と発泡スチロールの距離を 1 m とし、発泡スチロールの前後において圧力を測定して得た結果である。この結果から明らかなように、発泡スチロールは水中

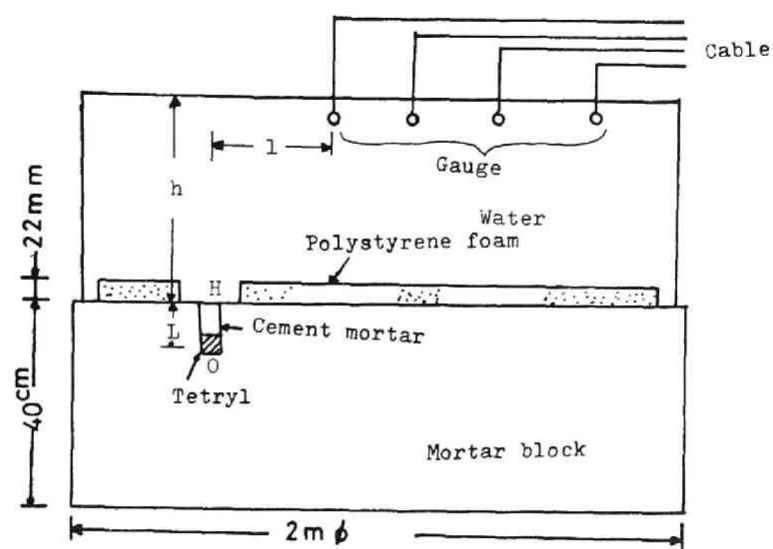


Fig.3.1 Test apparatus for gas pressure wave.

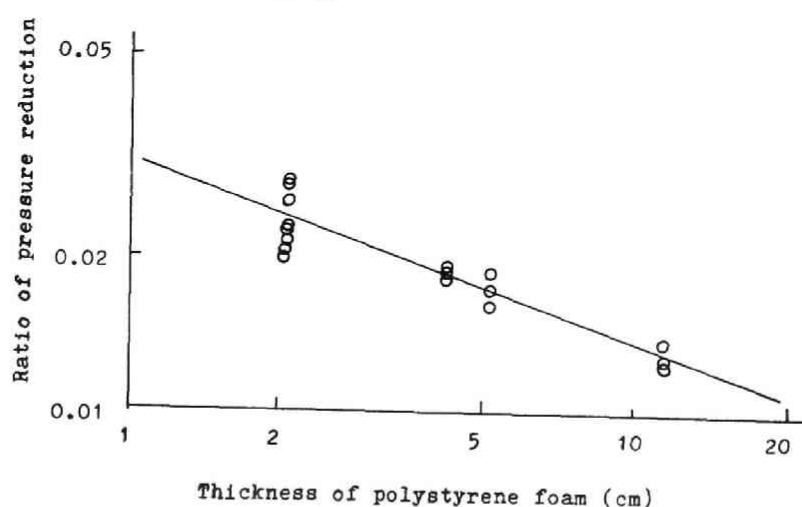


Fig.3.2 Pressure-attenuating characteristic of polystyrene foam.

Table 3.2 Properties of polystyrene foam.

Density	0.0175g/cm ³
Compressive strength	30kg/cm ²
Young's modulus	11.0kg/cm ²
Specific heat	0.27kcal/kg·C

圧力波の軽減効果がきわめて良好な材料である。さらに、地盤-水圧力波を抑制しない場合の圧力波も測定し、両者

の結果を比較検討した。

圧力はモルタルブロック上部の水中に配置した電気石ゲージにより受感して電気信号に変換し、これをトランジェントレコーダに記憶した後、X-Yレコーダにより再生した。

なお、本章において爆源や測点の位置を説明するために用いた記号はFig. 3.1に示すとおりである。すなわち、爆源をO、装薬孔の入口をHとし、最小抵抗線長をL、爆源から測点までの水平距離を l 、測点からモルタルブロック表面までの垂直距離を h で表わす。

第3.3節 実験結果および考察

3.3.1 モルタルブロックの破壊状況

第2章でも説明したように、Lが10cmを超えると漏斗孔は生成せず、ダンピングが吹き飛ぶかあるいは自由面上は何ら変化のない状態であり、いわゆる奥鳴りの状態であった。Lが8cmと10cmの間では漏斗孔が生成する場合としない場合があり、8cm未満になると、確実に漏斗孔が生じた。

生成した漏斗孔の形状をFig. 3.3およびFig. 3.4に示した。

Fig. 3.3を見ると、爆源のあった部分の周囲は球状の空洞が残っており、それから自由面に向かって円錐状に破砕されていることがわ

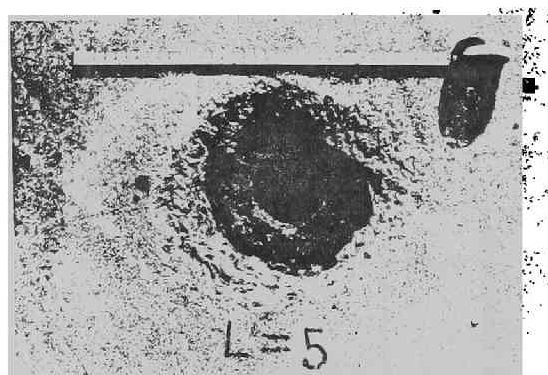


Fig. 3.3 Crater.

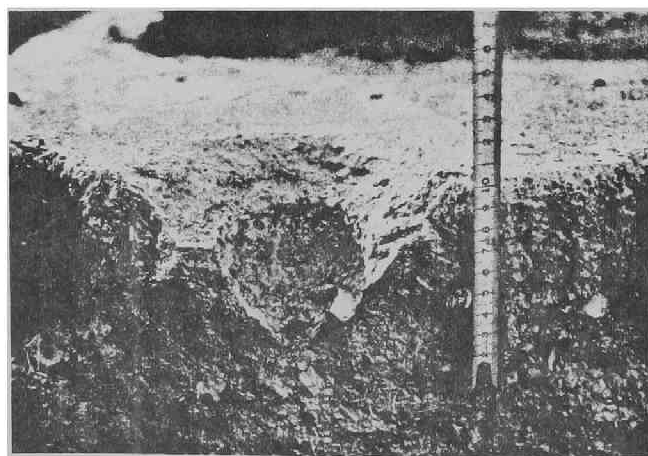


Fig. 3.4 Cross section of crater

かる。爆薬の周囲の球状の空洞は応力波によるせん断破壊圈、円錐状の破碎部は引張応力波による破碎圈と見なされる¹⁾。

漏斗孔の大きさはTable 3.3に示すとおりである。表より明らかなように、今回の実験では、自由面での漏斗孔の大きさはLが大きくなるにしたがって大きくなるような結果が得られた。

Table 3.3 Diameter of crater.

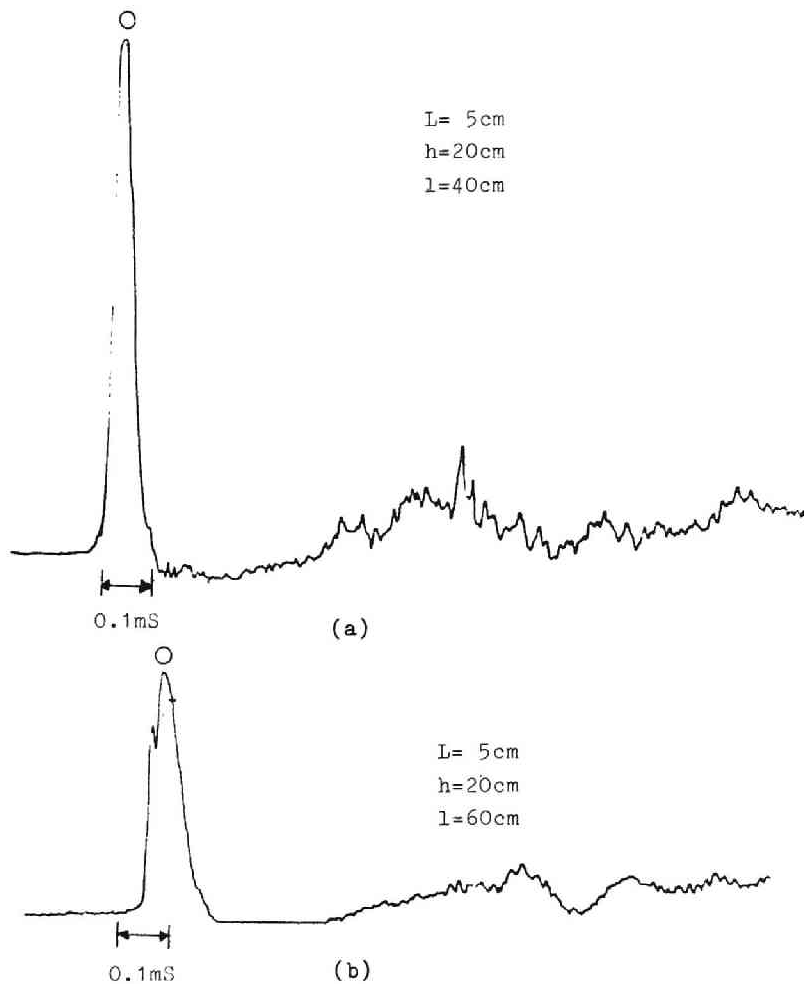
Mortar	L* (cm)	Maximum diameter (cm)	Minimum diameter	Average diameter
A Mortar	5.5	17.5	16.0	16.8
	6.5	20.0	18.0	19.0
	7.0	27.0	22.0	24.5
	8.0	45.0	24.0	34.5
B Mortar	3.0	12.0	10.5	11.3
	5.0	21.0	18.0	19.5
	10.0	43.0	34.0	38.5

*L:Length of line of the least resistance

3.3.2 観測された圧力波の種類

地盤-水圧力波を抑制して得られた圧力波形の例をFig. 3.5に、抑制しない場合の圧力波形の例をFig. 3.6に示す。波は急激な立ち上りをもったパルス状の圧力波（図において○印で示したもの）と振動性の圧力波が合成されたものである。Fig. 3.5の(b), (c), (d)では振動性の波の振幅はパルス状の波の振幅にくらべてはるかに小さい。これより、地盤-水圧力波を抑制した実験では振動性の圧力波が抑制されていることがわかる。そのため、振動性の圧力波は地盤-水圧力波であり、パルス状の圧力波はガス圧力波と考えられる。そこで、この点をさらに明らかにするために、波動の伝播時間について検討した。Fig. 3.7は、爆薬に巻いたトリガー線が切断してからパルス状の圧力波を受感するまでの時間 t_{GW} とH点から測点までの斜距離 R_G との関係を示したものである。図の直線の勾配は1.480m/Sであり、これは水中の音波の伝播速度と一致している。一方、観測された圧力波の初動部分、モルタルブロック中の弾性縦波が水中へ透過して生じた波動であると仮定して、トリガー線が切れてから波動が界面に達するまでの時間 t_{RM} と波動のモルタルブロック内の伝播距離 R_M との関係を求め、その結果をFig. 3.8に示した。なお、 t_{RM} は次式によって求めた。

$$t_{RM} = t_r - \frac{R_W}{C} \quad \text{----- (3.1)}$$



L : Length of path of the least resistance
 h : Distance from the surface of mortar block
 l : Horizontal distance from explosion source

Fig. 3.5 wave forms observed in tests in which polystyrene foam\$are used.

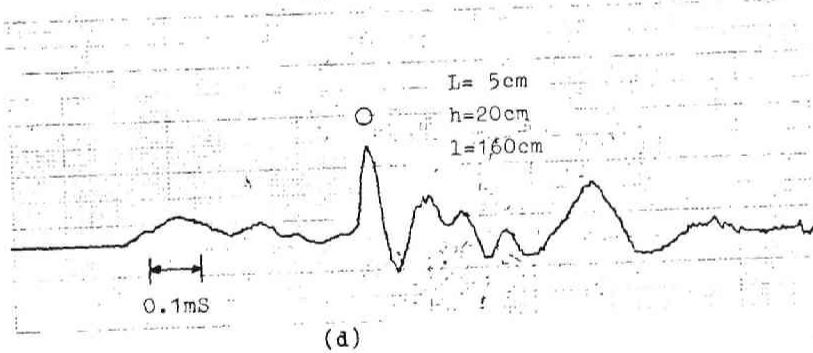
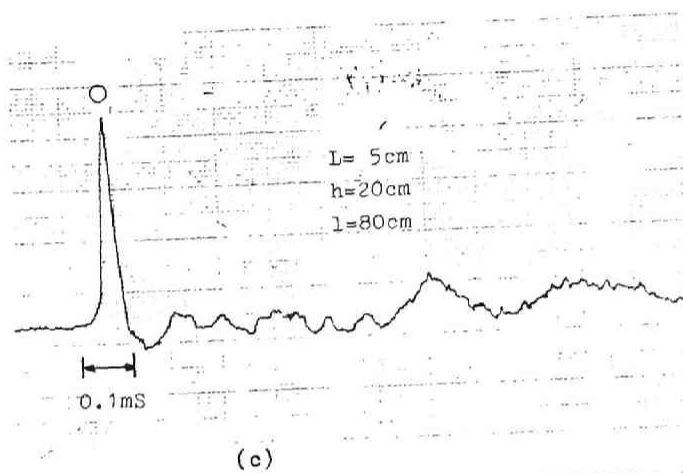


Fig.3.5 Continued.

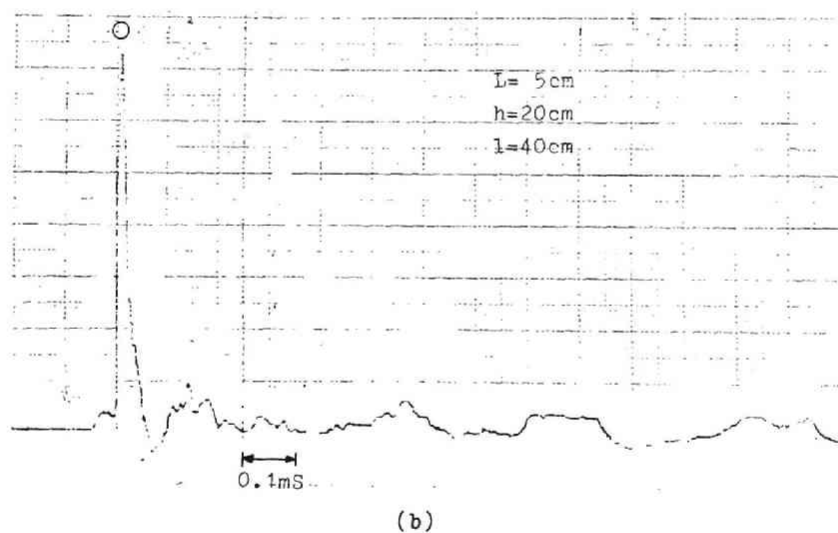
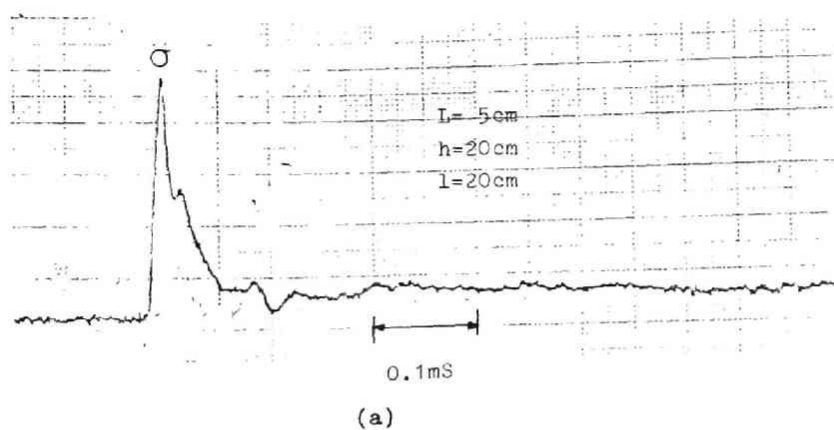
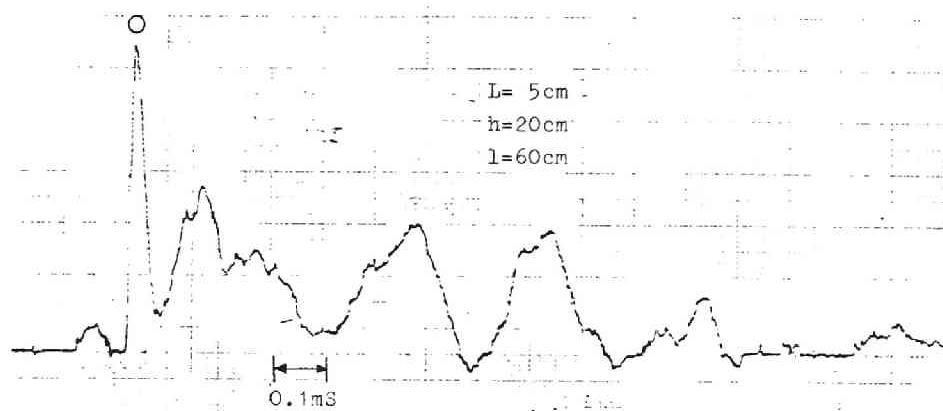
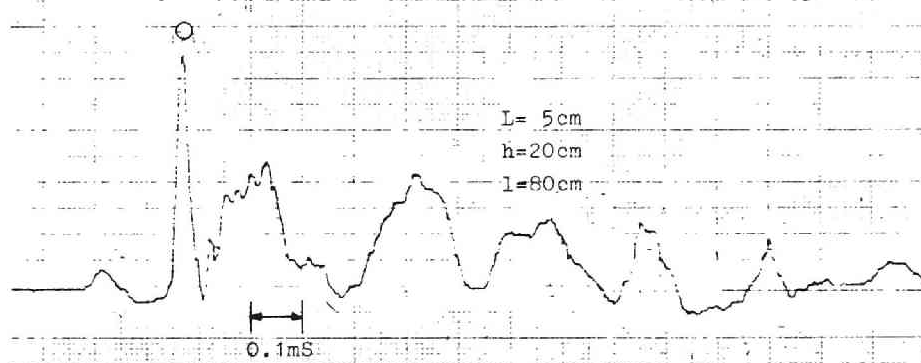


Fig.3.6 Wave forms observed in tests in which polystyrene forms are not used.



(c)



(d)

Fig.3.6 Continued

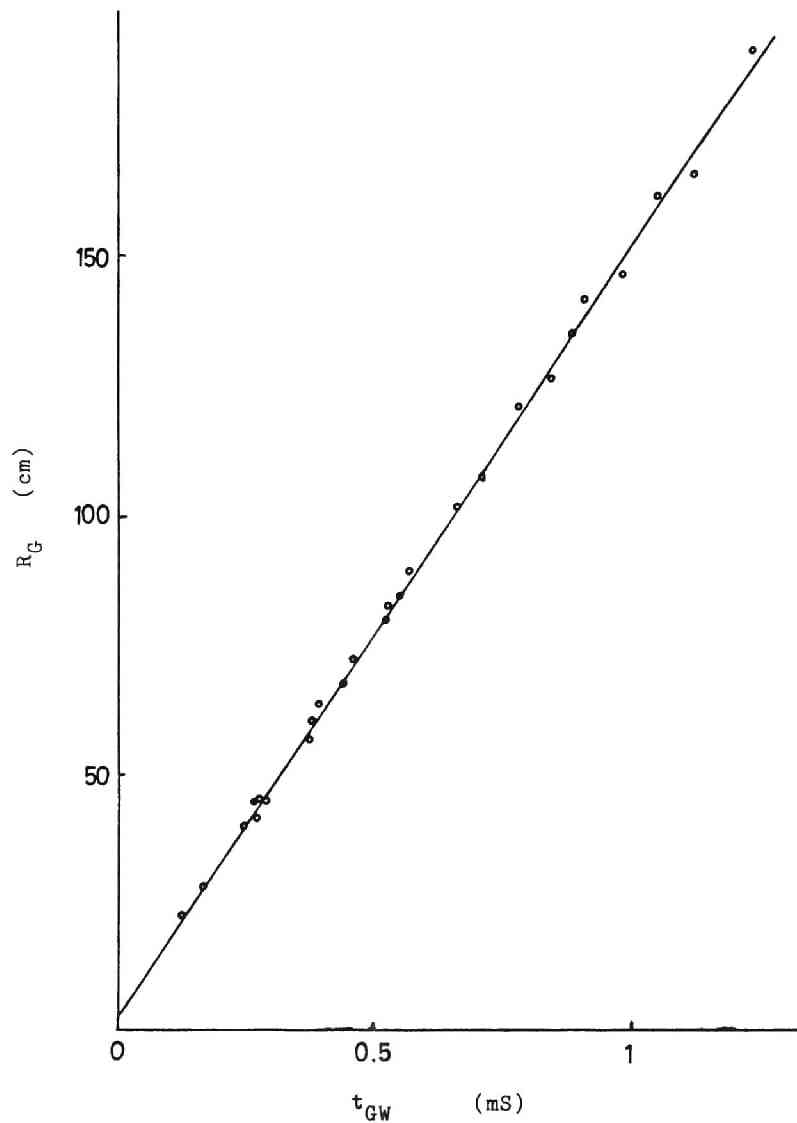


Fig.3.7 Relation between t_{GW} and R_G .

ここで、 t_τ ：トリガー線が切断してから圧力波の初動部を受感するまでの時間

R_W ：波動の水中部分の伝播距離

C ：水中の音速

Fig. 3.8はBモルタルブロックによる実験結果を示したものであるが、図に示す直線の勾配は $2,700\text{m/S}$ となり、これはBモルタルブロックの弾性縦波の伝播速度と一致する。これらの結果より、圧力波の初動はモルタルブロック中を伝播してきた弾性縦波が水中へ透過して生じたものであり、パルス状の圧力波はガス圧力波であるといえよう。

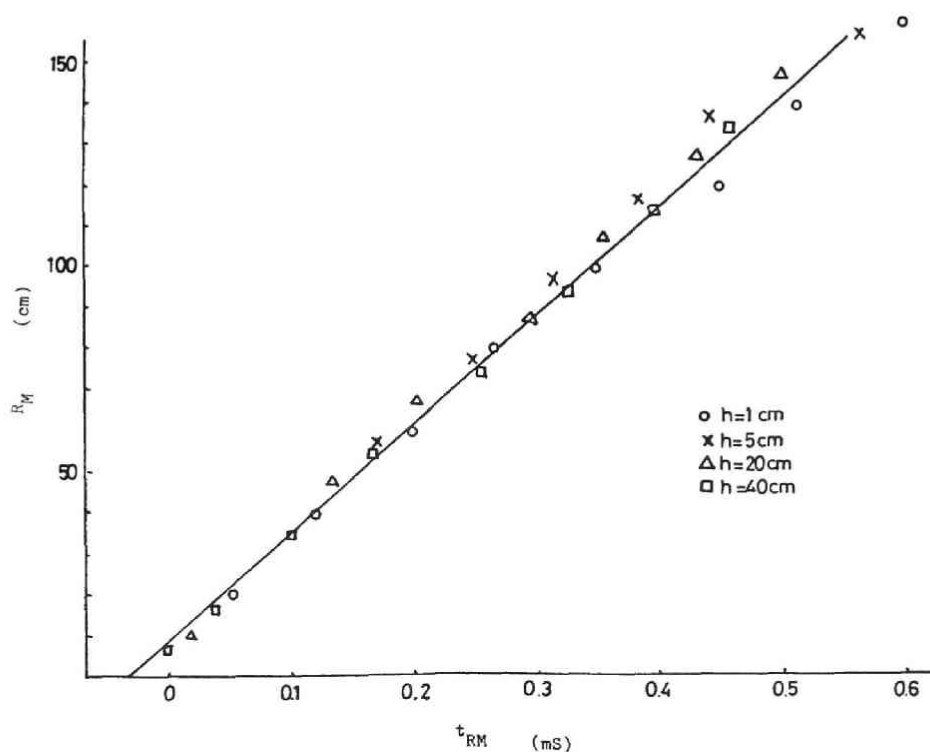


Fig.3.8 Relation between t_{RM} and R_M .

3.3.3 ガス圧力波の波形的特徴

爆源直上方向に伝播する波動はパルス状であるが、この場合の立ち上がり時間 T_1 と最小抵抗線長 L およびモルタルブロック面から測点までの距離 h との関係を Fig. 3.9 に示した。この結果、漏斗孔の生ずる場合も無自由面爆破での圧力波と同様、波動の立ち上がり時間 T_1 は L が小さくなる程、また h が大きくなる程短くなる。また、爆源直上方向での圧力波のパルス幅は L , h に関係なくほぼ一定で、その大きさは無自由面爆破の場合とほぼ同程度である。

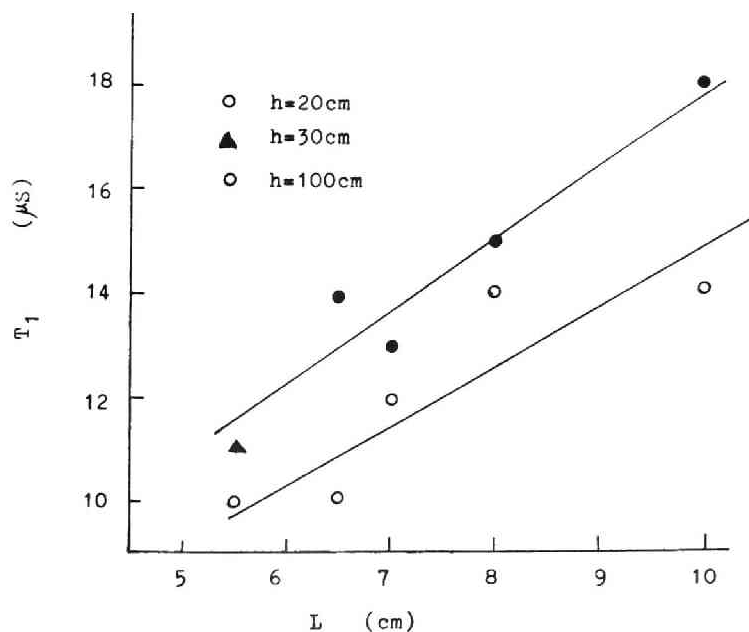


Fig.3.9 Relation between T_1 and L .

T_1 : Rise time

3.3.4 ガス圧力波と地盤-水圧力波の圧力値の比較

一自由面爆破では漏斗孔の部分は破壊されるので、ここでは弾性理論は成り立たない。そのため、漏斗孔直上方向へ伝播する圧力波はガス圧力波が卓越するものと考えられる。Fig. 3.10は、Aモルタルブロックの実験で得られた爆源直上方向($L=0$)の測点における圧力最高値 P_s と L との関係を示したものである。図中の実線は第2章で述べた無自由面爆破実験で得られた関係を示したもので、点線はこれらを外挿したものである。○印および×印でプロットした値は一自由面爆破の場合の実測値である。△印については後述する。また、Fig. 3.11は6号電気雷管を爆源に用いて同様の実験を行なって求めた P_s と L との関係を示したものである。これより爆源直上方向に伝播する波動については、ガス圧力波の圧力最高値は地盤-水圧力波について得られた結果を外挿して求められる値よりやや小さいことがわかる。また、この外挿線と実測値との差は L が小さい程あるいは h が大きい程大きい傾向が見られる。そこで、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $h = 0$ でのこの両者の差を調べた。Aモルタルブロックの実験によって得られた $h = 20\text{cm}$ ($L = 5.5\text{cm}$ については 30cm)および 100cm の場合の圧力最高値を第2章で示した(2.5)または(2.6)式に代入して、ガス圧力波の $\alpha = 0^\circ$ 方向への距

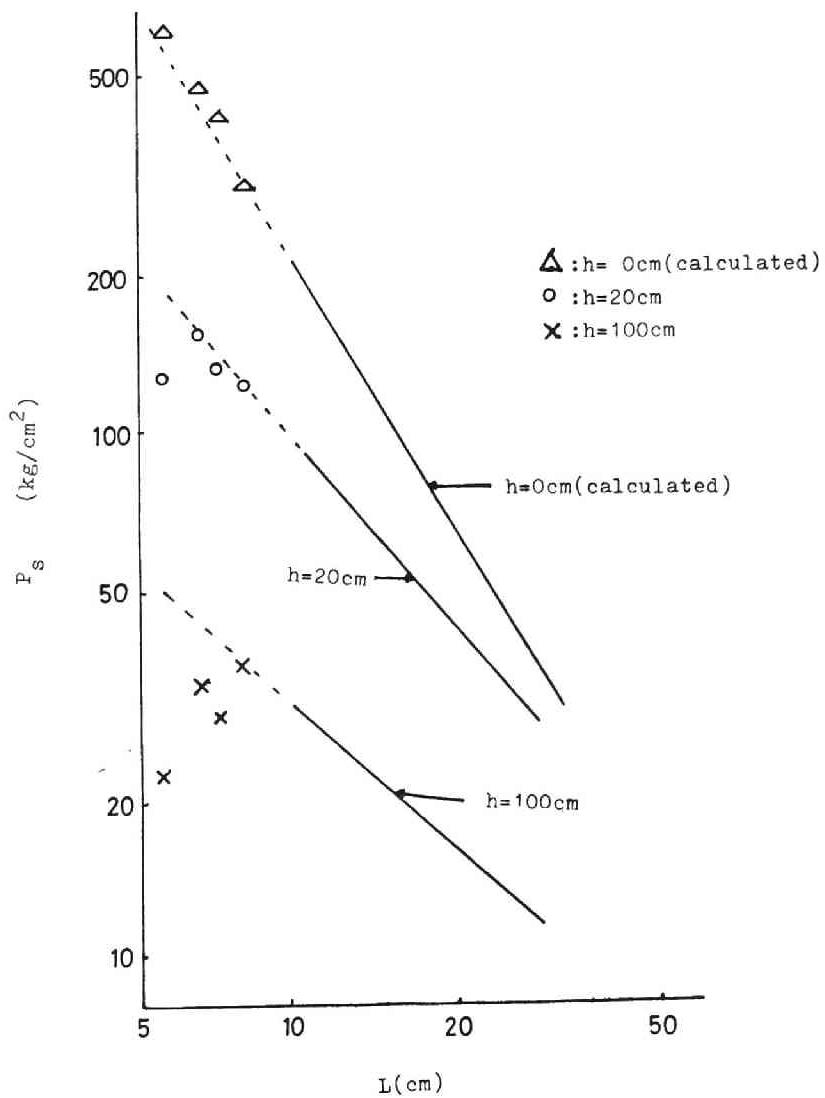


Fig.3.10 Relation between observed peak pressure P_s and L .
(Source:Tetryl 10g)

離減衰指数 ($r = r_\phi = r_\theta$) を求め、この値を次の (3.2) 式に代入して、 $\alpha = 0^\circ$, $h = 0$ でのガス圧力波の圧力最高値 $(P_G)_{h=0, \alpha=0}$ を求めて、Fig. 3.10 に \triangle 印で示した。

$$(P_G)_{h=0, \alpha=0} = (P_G)_{h=100, \alpha=0} \times \left(\frac{(R_{W2} + R_\phi)_{\alpha=0}}{(R_\phi)_{\alpha=0}} \right) \dots\dots\dots (3.2)$$

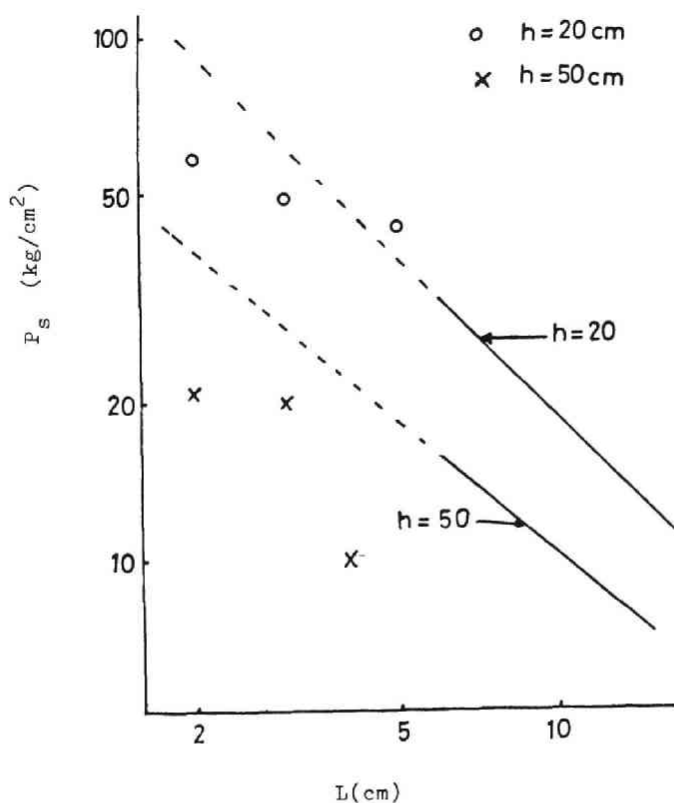


Fig.3.11 Relation between observed peak pressure P_s and L . (Source: No.6 Detonator)

これより、爆源直上方向の $h = 0$ のガス圧力波の圧力最高値は、地盤-水圧力波について得られた結果を外挿して得られる値とよく一致していることがわかる。

3.3.5 ガス圧力波の伝播特性

ガス圧力波の伝播特性をさらに詳しく検討するために、地盤-水圧力波を抑制した実験の測定結果について解析した。Fig. 3.12は、H点から各測点までの斜距離 R_G とガス圧力波の圧力最高値 P_G との関係を、伝播方向毎に図示したものである。なお、この場合の方向は、OとHを結ぶ直線と伝播方向とのなす角度 θ で表わした。

ガス圧力波がHを中心とした球面波であると仮定すると、 P_G は次式によって与えられる。

$$P_G = K \cdot R_G^{-1.13} \quad \text{..... (3.3)}$$

ただし、 K は定数である。

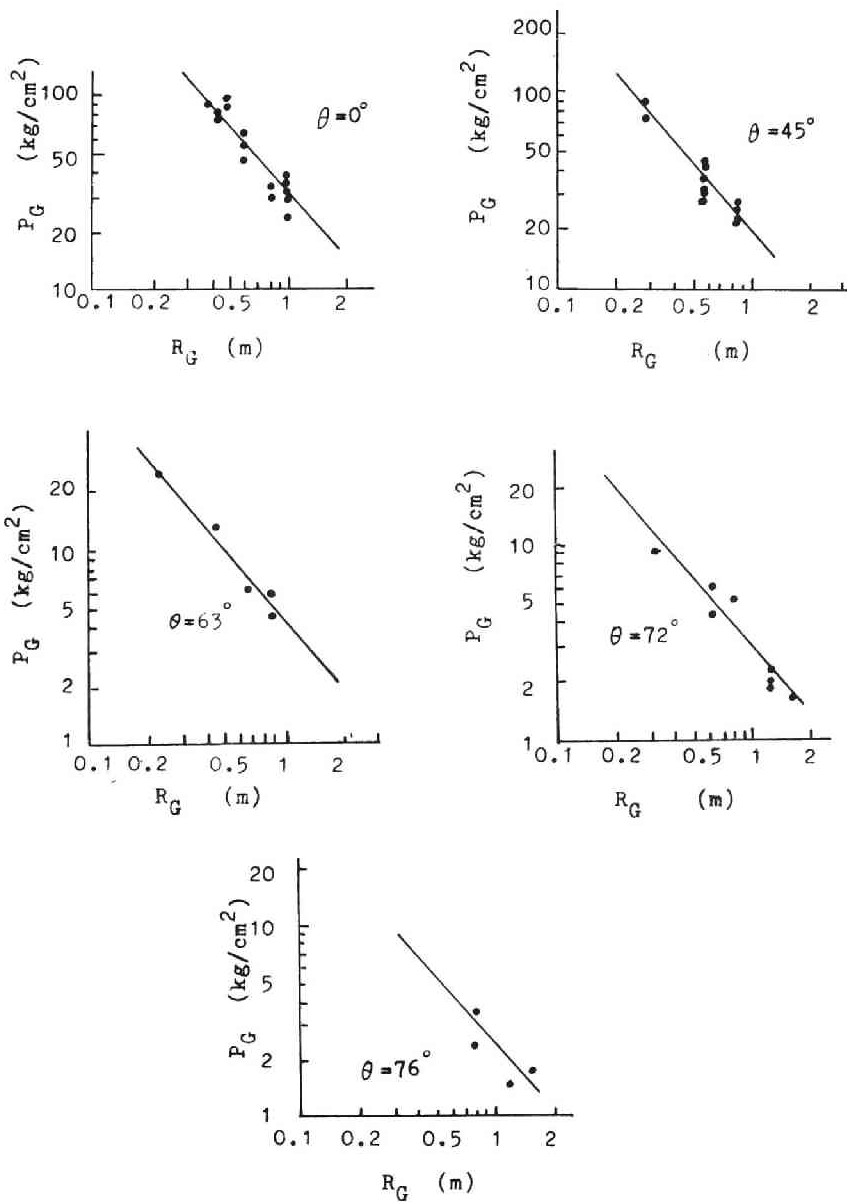


Fig.3.12 Relation between P_G and R_G .

そこで、Fig. 3.12に示した P_G および R_G の測定値を(3.3)式に代入して K の値を計算し、方向角毎に K の平均値を求めた。さらに、これらの値を(3.3)式の K の値に代入すると、それぞれの方向角毎に次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_G &= 32 R_G^{-1.13} & (\theta = 0^\circ) \\ P_G &= 20 R_G^{-1.13} & (\theta = 45^\circ) \\ P_G &= 4.6 R_G^{-1.13} & (\theta = 63^\circ) \\ P_G &= 3.1 R_G^{-1.13} & (\theta = 72^\circ) \\ P_G &= 2.4 R_G^{-1.13} & (\theta = 76^\circ) \end{aligned} \right\} \text{----- (3.4)}$$

Fig. 3.1 2に示した直線は(3.4)式
 式の関係を表わしたものである。
 これより、実測で求めた P_G と R_G
 との関係は、ほぼ(3.4)式を満
 足することがわかる。(3.4)式
 では R_G の指数を一定としているの
 で、係数 K の値を比較することによ
 り、伝播方向によるガス圧力波
 の大きさの差異を検討することが
 できる。そこで、方向角 θ と係数
 K との関係を図示すると、Fig.
 3.1 3が得られる。Fig. 3.1 3か
 ら明らかなように、ガス圧力波の
 圧力最高値には方向性があり、方
 向角 θ が大きくなるにつれて、圧
 力最高値は小さくなることがわか
 る。

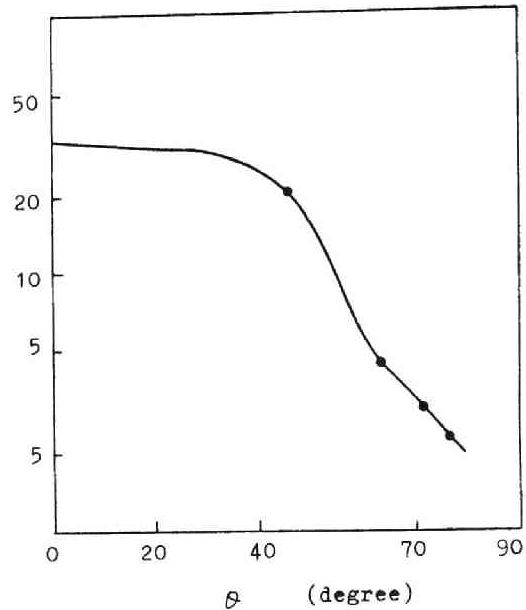


Fig.3.13 Relation between K and θ .

3.3.6 考察のまとめ

一自由面せん孔爆破に伴う水中圧力波は、地盤-水圧力波とガス圧力波が重畳したものである。地盤-水圧力波は地盤中を伝播してきた弾性波が地盤との界面で水中へ透過して生ずる圧力波であり、ガス圧力波は爆破により生じたきれつなどを通り、また破壊された岩塊の突出に伴って生成ガスが水中へ噴出することにより生成するものである。前者の伝播特性については、第2章において無自由面爆破の場合を対象として弾性理論あるいは音響理論を用いて検討し、その伝播特性を明らかにした。今回得られた結果もそれらと矛盾しなかった。また、この圧力波の波形の特徴は、 l/h が小さい領域では、第2章で述べた測定結果に示

されているようにパルス波形であるが、Fig. 3.6から明らかなように、 l/h が大きくなると振動波形となる。一方、ガス圧力波の圧力波形は、Fig. 3.5に示されているように、比較的急峻な立ち上りをもったパルス波形である。ガス圧力波は方向性をもっており、方向角 θ が大きくなるにつれて圧力値は小さくなる。そのため、Fig. 3.6の圧力波形で見られるように θ が数10度以下の時はガス圧力波が卓越しているが、 θ が大きくなると、ガス圧力波が小さくなるので、地盤-水圧力波が卓越するようになる。

第3.4節 結 言

一自由面せん孔爆破に伴う水中圧力波は、地盤中を伝播してきた弾性波が水中へ透過することにより生ずる波動（地盤-水圧力波）と、爆破により生じたきれつなどを通り、また破壊された岩塊の突出に伴って爆発生成ガスが漏斗孔から噴き出す時に生ずる波動（ガス圧力波）の2つが合成されたものである。地盤-水圧力波の圧力波形は、 l/h が小さい領域ではパルス状の波形であるが、これらが大きい領域では振動波形となる。一方、ガス圧力波の圧力波形は比較的鋭い立ち上りをもったパルス波形である。

ガス圧力波は水中へ放射状に広がるが、伝播する方向角 θ によりその圧力値が異なり、 θ が大きくなるにつれて圧力値は小さくなる。それ故、爆源直上方向へ伝播する波動はガス圧力波が卓越するが、 θ が大きくなるとガス圧力波は小さくなり、地盤-水圧力波が卓越するようになる。

参 考 文 献

- 1) 佐々宏一、伊藤一郎：材料、21，P.123（1972）

第4章 水中せん孔爆破に伴う水中圧力波に関する現場実験結果の解析

第4.1節 緒 言

第1編第2章、第3章では、水中せん孔爆破に伴う水中圧力波の特性を水槽実験によって検討したが、さらに実規模の水中せん孔爆破実験による検討が行なえればきわめて望ましいことである。たまたま本州四国連絡橋公団は昭和50年2月～3月に香川県坂出沖において、実規模の海底せん孔爆破実験を行なった。本章では、上記の海底せん孔爆破実験で計測された水中圧力波についての計測結果と、これをもとにして著者が行なった水中圧力波の伝播特性についての検討結果について述べる。

実験は、無自由面爆破と一自由面爆破の2通りが実施された。

第4.2節 試験爆破の概要

この試験の目的は、水中せん孔爆破の施工技術の検討と、爆破による周辺環境への影響の把握であった。Fig.4.1は実験地点付近の概略を示したものであるが、爆破が実施された地点は図中に4Aおよび7Aと示されている2か所である。4A地点では一自由面爆破実験を（以下これを4A爆破と呼ぶ）、7A地点では無自由面爆破実験（以下これを7A爆破と呼ぶ）を実施した。

4A爆破では三つ子島の1つである二面島の汀線近傍の岩盤を4回に分けて爆破した。これらの4回の爆破の条件をTable 4.1に示す。

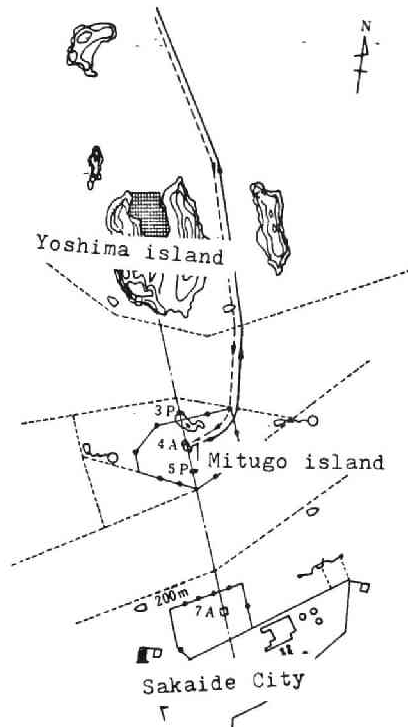


Fig.4.1 Site of experiments

Table 4.1 Blasting conditions at 4A area.

Test No.	1	2	3	4
Depth of borehole(m)	5	5	5	5
Number of borehole(m)	12	24	36	76
Length of borehole(m)	5	5	5	5
Diameter of borehole(mm)	153	153	153	153
Spacing of borehole(m)	2	2	2	2
Diameter of charge(mm)	75	75	75	90
Length of charge(m)	3.2	3.2	3.2	2.7
Total amount of charge(kg)	240	480	720	1520

爆破に先立って、T.P.-5 mより上の堆積層はグラブ船で浚せつし、その後露出した岩盤面から垂直下方に長さ5 mの装薬孔が0 Dせん孔機¹⁾により所定の本数だけせん孔された。各装薬孔には1孔あたり爆薬20 Kgずつが装填された。爆薬は海底爆破用に開発されたGX-1ダイナマイトである。爆破対象岩は風化花崗岩で、風化の程度は場所により差があり、弾性波速度(P波)は2,500 m/S~3,500 m/Sであった。第1回~第3回爆破では導爆線起爆、第4回爆破では超音波速隔起爆法が用いられた。

7A地点は、水深約15 mの海底下に約30 mの厚さの砂礫層が堆積しており、その下に風化花崗岩がある。ここでは上部に堆積している砂礫層を残したまま風化花崗岩を爆破する工法を試みた。破碎の対象となった岩盤はT.P.-45 m~T.P.-50 mの風化花崗岩で、その特性は場所によりかなり差があり、そのP波速度は2,500 m/S~4,000 m/Sである。爆破試験は5回行なわれたが、各爆破の条件はTable 4.2に示すとおりである。なお、第3回、第4回および第5回はい

ずれも段発爆破が行なわれたが、その段差は第3回爆破の1段と2段の間のみが2秒で、それ以外はすべて1秒の段差で行なわれた。装薬孔は、

Table 4.2 blasting conditions at 7A area

Test No.	1	2	3			4			5					
Kind of* blasting	1	1	D			D			D					
Delay time (S)	0	0	0	2	3	0	1	2	0	1	2	3	4	5
Depth of water(m)	13.6 ~15.6	13.5 ~15.0	14.1 ~14.2	14.1 ~14.2	14.0 ~11.5	14.0 ~11.1	14.0 ~14.5	14.0 ~11.1	14.3 ~14.4	14.0 ~14.2	14.1 ~14.2	14.2 ~11.4	13.9 ~14.1	14.2 ~14.3
Number of boreholes	9	9	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Borehole length(m)	32.4 ~36.0	35.5 ~3.5	34.8 ~34.9	31.6 ~35.2	31.7 ~34.9	31.4 ~35.0	33.5 ~36.5	30.3 ~35.4	34.5 ~34.7	34.8 ~35.0	34.2 ~34.7	34.2 ~37.4	31.9 ~35.2	34.6 ~35.1
Amount of charge(kg)	180	180	60	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80

*I:Instantaneous blasting D:Delay blasting

海面上に設置された台船に据えたせん孔機によって、T.P.-50 mまで垂直にせん孔された。使用したせん孔機は0 Dせん孔機とウェルマンせん孔機で、せん孔径は前者の場合には153 mm 後者の場合には146 mmである。また、いずれの装薬孔にも1孔あたり20 KgのGX-1ダイナマイトを装填し、装薬長は3.27 m、薬径は70 mmであった。

第4.3節 水中圧力波の計測

水中圧力波の計測には、
半導体トランスジューサ
であるKulite-HKMS
-375と豊田工機製
PMS-5 Mが使用された。
これらの圧力計より発信
された信号は、測定ケー

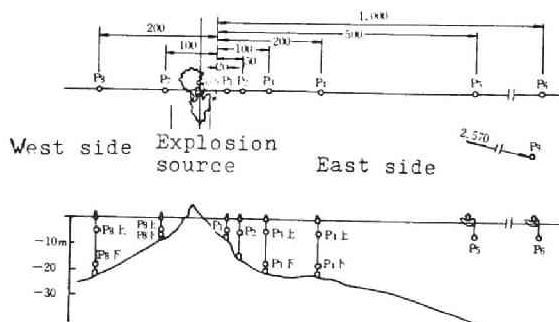


Fig.4.2 Arrangement of pressure gauges near 4A area.

ブルで、近隣の小島および台船上に設けた計測室へ送り、増幅器を通して、データレコーダに収録された。この際使用された測定系の周波数特性は、DC～20 KHz の信号に対して一様な応答性を有している。

4 A 爆破では、Fig.4.2 および Table 4.3 に示すように9地点に測点を設け、それぞれに圧力計 (Kulite HKMS -

Table 4.3 Position of pressure gauges near 4A area

Measuring point	Distance from blasting point (m)	Depth of gauge (m)	Depth of sea water (m)
P ₁	East 20	5	7
P ₂	East 50	5	16
P ₃ U	East 100	5	21
P ₃ L		19 (Test No.4 17)	
P ₄ U	East 200	5	22
P ₄ L		18	
P ₅	East 500	5	40.5
P ₆	East 1000	5	40.5
P ₇ U	West 100	5	8
P ₇ L		6	
P ₈ U	West 200	5	12
P ₈ L		10	
P ₉	East 2570	5	-

375)を設置した。P₇ および P₈ 点は、爆源から見て島の裏側にあるので、爆破によって生じた波動がこれらの点に達するには島の下の岩盤を通らなければならない。その他の測点は爆破点側にあるので、爆破点と圧力計を結ぶ線上の媒質はすべて海水である。

7 A 爆破での測点の位置を Fig.4.3 および Table 4.4 に示す。第1回および第2回試験爆破

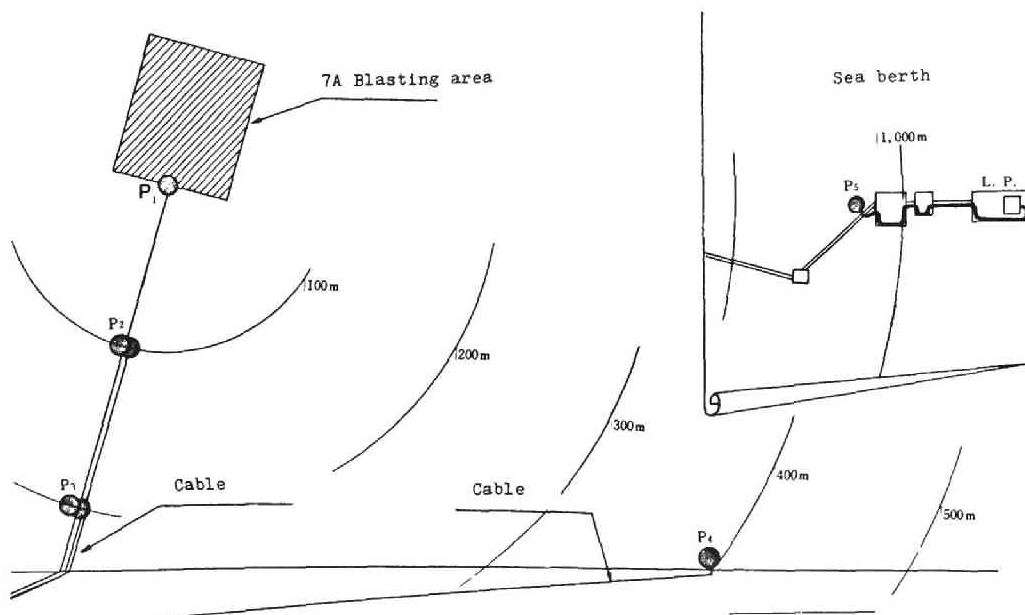


Fig.4.3 Arrangement of pressure gauge near 7A area.

では $P_3 \sim$

P_5 点で水

中圧力波の

計測を行な

い、これら

の測定には

豊田工機製

PMS-5M

Table 4.4 Depth of water and pressure gauges at measuring points near 7A area.

Measuring point	Depth of sea water (m)	Depth of gauge (m)	Distance from blasting centre (m)
P_{1U}	14	2.5	50~65
P_{1J}	14	11.5	45~60
P_2	11	2.5	140~155
P_3	6	2.5	235~250
P_4	5	2.5	415~440
P_5	-	2.5	980~995

を使用した。第3回～第5回の試験爆破では、全測点で水中圧力波を計測したが、その際使用した圧力計は、 P_1 点～ P_3 点では Kulite HKMS-375、 P_4 および P_5 点では豊田工機製 PMS-5M である。

第4.4節 実験結果の解析および考察

4.4.1 4A地点の試験爆破

(a) 圧力波形について

4A地点での試験爆破によって得られた水中圧力波の波形の例を Fig 4.4 に示す。爆破後初動が測点に達するまでの時間 ΔGR と、爆源の中心から測点までの距離 R とから水中圧力波の初動の走時曲線を描き、Fig 4.5 に示した。この結果、走時曲線の勾配が $2,500\text{ m/S} \sim 3,000\text{ m/S}$ 程度のものと、 $4,000\text{ m/S}$ 強程度のものが見られるが、前者は風化花崗岩の、後者は風化の程度の少ない花崗岩のP波の伝播速度と一致している。故に観測された水中圧力波の初動は、爆源で生じた応力波が岩盤中を伝播し、その後水中へ透過してきた波動、すなわち地盤-水圧力波であることがわかる。

Fig 4.4 によれば、 P_1 点で得られた水中圧力波形では、最初に正圧があらわれ、その後急激に圧力が低下し、絶対圧力が零の状態をしばらく持続している。このような圧力波形が得られる理由は次のように考えれば説明できる。すなわち、最初に計測点に到達する波動は、先に述べたように、地盤から水中へ透過してきた圧力波であるが、この圧力波は正圧をもつために最初に正圧が現われている。続いて、水面からの反射波が負圧を伴ないつつ計測点に到達するから、その影響により圧力波は急激に減衰する。海水は耐張力性をもたないために、この際の合成圧が本来負になるべきところでも絶対圧としては零を示すことになる。このように、絶対圧が零を示している領域は Cavitation 領域と呼ばれ、現象的には多数の細かい真空泡ができていくことになる。このように、水深の浅い場所で観測される水中圧力波では、海面からの反射波が圧力波形に大きな影響を及ぼすが、このことは、今回の4A地点で

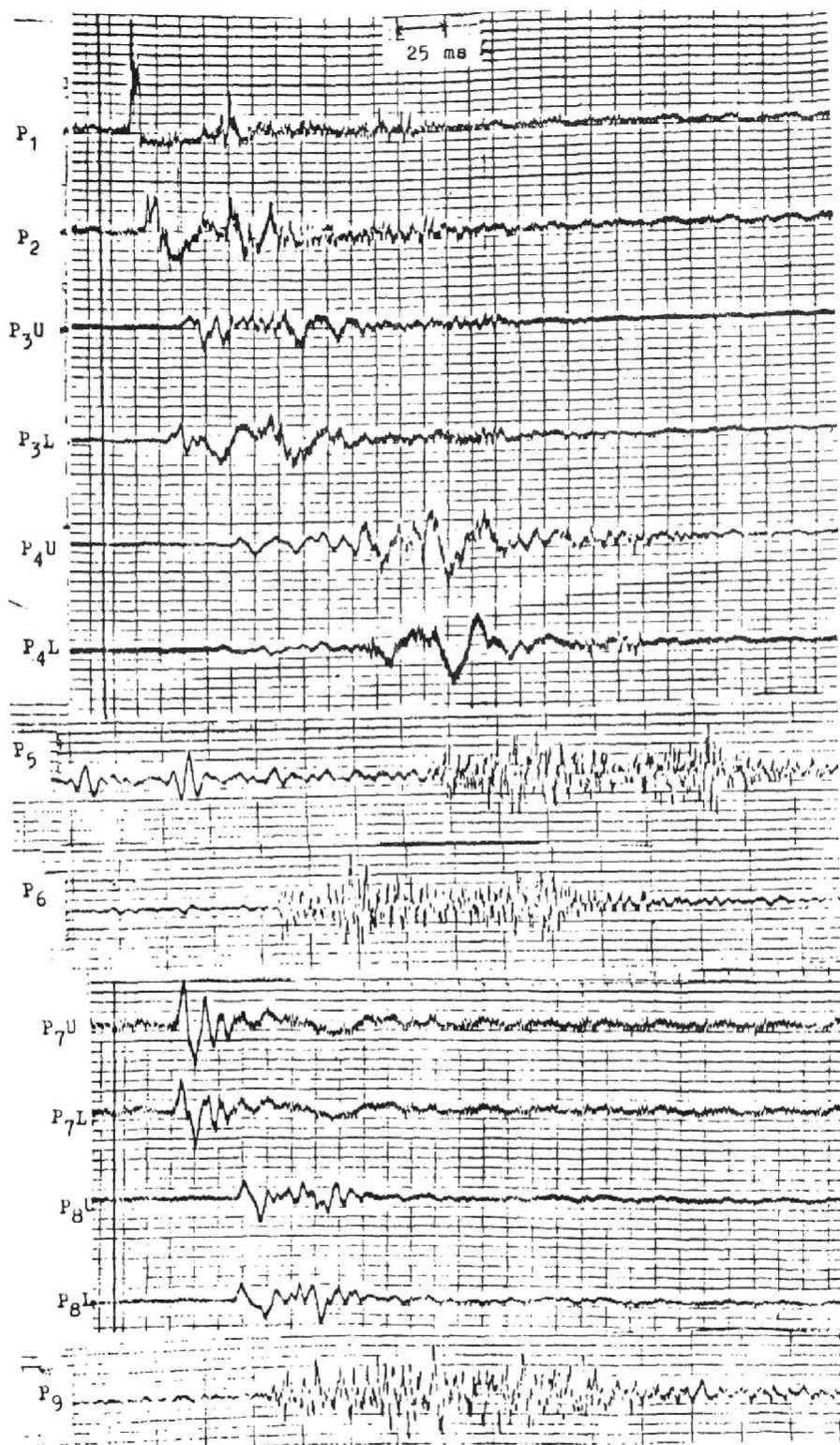


Fig.4.4 Example of observed waveform (4A-No.1)

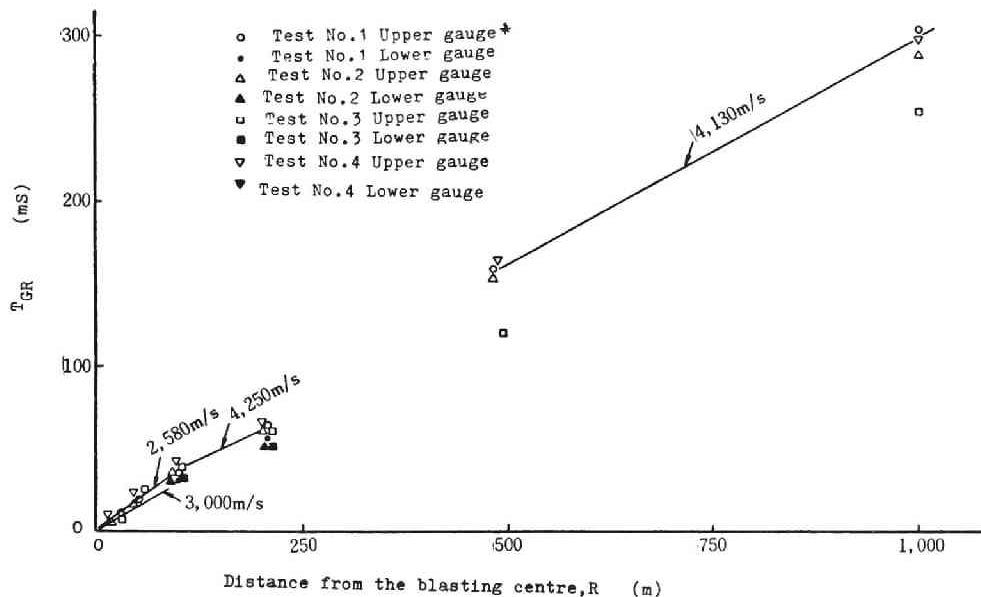


Fig.4.5 Relation between t_{GR} and R (4A).

*Upper gauge: Depth of gauge from the sea surface is 5m.

の爆破実験に際し、 P_1 点や P_2 点のように比較的爆源に近い測点で観測された圧力波形の初動部付近によく現われているといえることができる。しかし、爆源からさらに離れた遠方の測点では海面からの反射波のほかに、海底やさらにその下の地層との境界で反射した反射波あるいは屈折波などの影響も加わり、圧力波としてもきわめて複雑なものとなると考えられる。

一方、Pekeris²⁾や Papadakis³⁾らは、空気層と岩盤層にはさまれた水層で火薬類の水中吊るし爆発を行なったときの水中圧力波の伝播について理論的に検討した。その結果、波源から遠く離れた所では、水中圧力波は両界面での反射波が重畳した複雑な分散波となり、これらは Ground wave, Water wave および Airy wave からなっていること、また、Ground wave は比較的低周波、Water wave は高周波であり、群速度は Ground wave の最も早いものが岩盤中の音速に、Water wave の最も早いものが水中での音速に等しく、Airy wave の群速度はこれら両者の群速度より遅いことなどを明らかにしている。

そこで、彼らの示している上記の理論的検討により得られた結果と、4A 爆破により得られた実測結果とを対比して考えてみる。前者では水層に、後者では岩盤層に爆源がある。ま

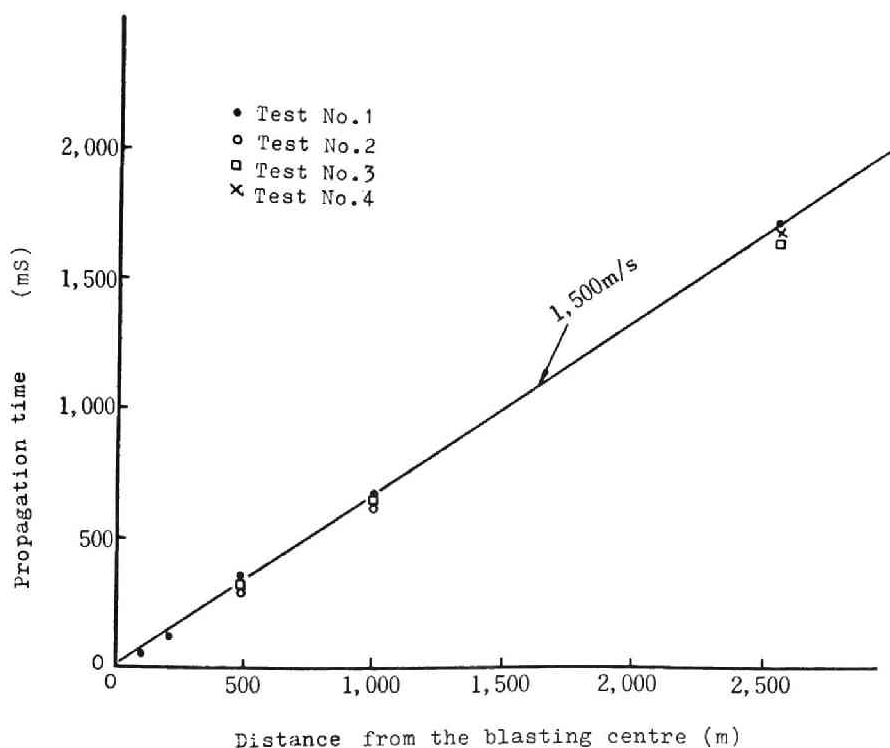


Fig.4.6 Relation between propagation time and the distance from the blasting centre for high frequency waves observed at P_5 , P_6 and P_9 measuring points.

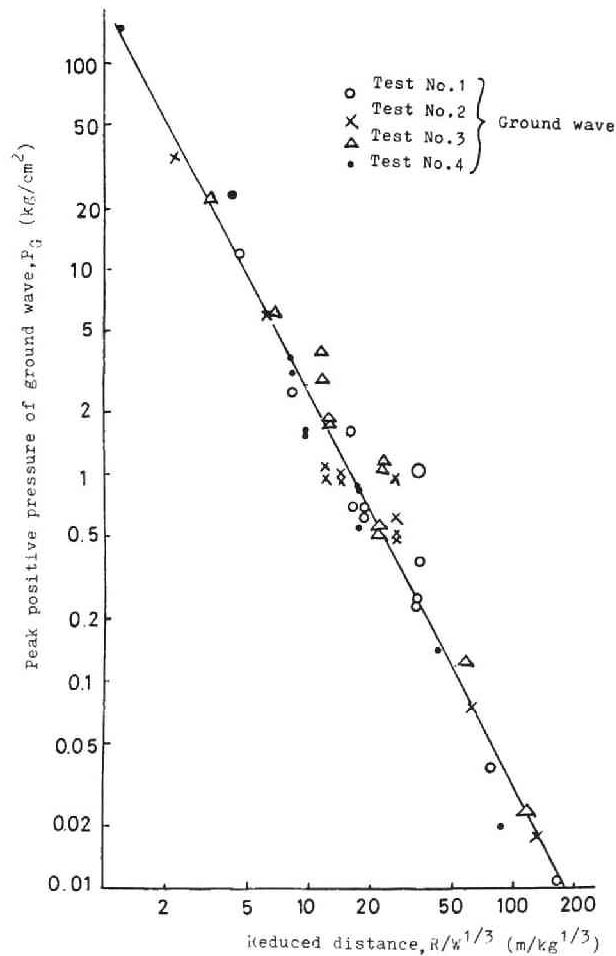
ず、Fig.4.4 に示した波形にも見られる高周波の波動のみについてその走時曲線を求め、その結果を Fig.4.6 に示した。ただし、今回の計測結果のうち、高周波の波動の始まりが明瞭に判別できるのは P_5 、 P_6 および P_9 の各測点で計測された波形であるから、Fig. 4.6 には第1回実験から第4回実験を通じて上記の3測点で観測された圧力波形について求めた走時関係を示した。Fig. 4.6 に示された走時曲線の勾配はほぼ $1,500 \text{ m/s}$ の値となり、この値は海水中での音速と一致している。したがって、上記の3測点で観測された高周波の波動は、Pekeris らが理論的検討の結果より指摘している Water wave と考えてよい。一方、波形の初動部にみられる地盤—水圧力波は、比較的低周波であること、およびその走時曲線の勾配が岩盤中での音速に一致していることより彼らのいう Ground wave に対応するものと思われる。また、この Ground wave は、海底岩である風化花崗岩の影響のみならず、さらにその下に存在している新鮮な花崗岩層との境界での反射波や屈折波の影響も受けているものと考えられる。

(b) 圧力の大きさについて

Water wave の圧力の大きさを明瞭に読みとることのできる記録は P_5 , P_6 および P_0 の各測点で得られた記録である。そこで、これらの3測点での測定結果から求めた Water wave の圧力の大きさ P_w (Kg/cm^2) と爆源からの換算距離 $R/W^{1/3}$ (R : 爆源からの距離 (m), w : 薬量 (Kg)) との関係をも最小自乗法で整理すると、次式を得た。

$$P_w = 25.3 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.1} \dots\dots\dots (4.1)$$

また、Fig. 4.7 には Ground wave の圧力の大きさ (正圧) と換算距離との関係を示した。Fig. 4.7 に示した結果をも最小自乗法を用いて整理し、次式を得た。



F.g.4.7 Relation between P_G and $R/W^{1/3}$ (4A)

$$P_G = 197 \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.9} \dots\dots\dots (4.2)$$

ここで、 P_G : Ground wave の圧力の大きさ (Kg/cm^2)

W : 薬 量 (Kg)

R : 爆源からの距離 (m)

(4.1)式および(4.2)式から明らかなように、Ground wave の圧力の大きさは爆源からの距離の約1.9乗に反比例しているが、Water wave についてはその圧力の距離減衰指数は1.1である。このことから、Ground wave の方が距離に対する減衰が大きいので、Fig. 4.4の波形例に見られるように、爆源に近いところではGround wave が卓越するが、爆源から遠く離れた点ではWater wave が卓越してくることがわかる。

(c) 水中圧力波形に及ぼす島の影響

4 A 爆破では、汀線近くを爆源として、二面島をはさんで東西方向に測圧点を配置しているので、島の存在が水中圧力波にどのような影響を及ぼしているかについて検討してみる。

Fig. 4.8は、水中圧力波の伝播方向との関係が分りやすくなるようにFig. 4.7を書き直したものであるが、これよりGround wave の圧力の大きさには伝播方向による差異は認められず、島が存在することによる影響はGround wave にはあらわれていないことがわかる。一方、Water wave については、Fig. 4.4の圧力波形をもとにしてこの点について検討してみる。爆源に対して西側の測点 P_7 および P_8 点と対称な位置にある東側の測点は P_3 および P_4 点である。そこで、これらの4点で測定された圧力波形を比較すると、東側の測点で得られた圧力波形と西側の測点で得られたそれらとは差異が見られる。すなわち、東側の P_3 および P_4 点で得られた圧力波形ではGround wave の上に高周波波動が重なっているが、西側の P_7 および P_8 点で得られた圧力波形には高周波波動は見られない。このことは、西側へのWater wave の伝播が島により阻止されていることを示すものと思われる。

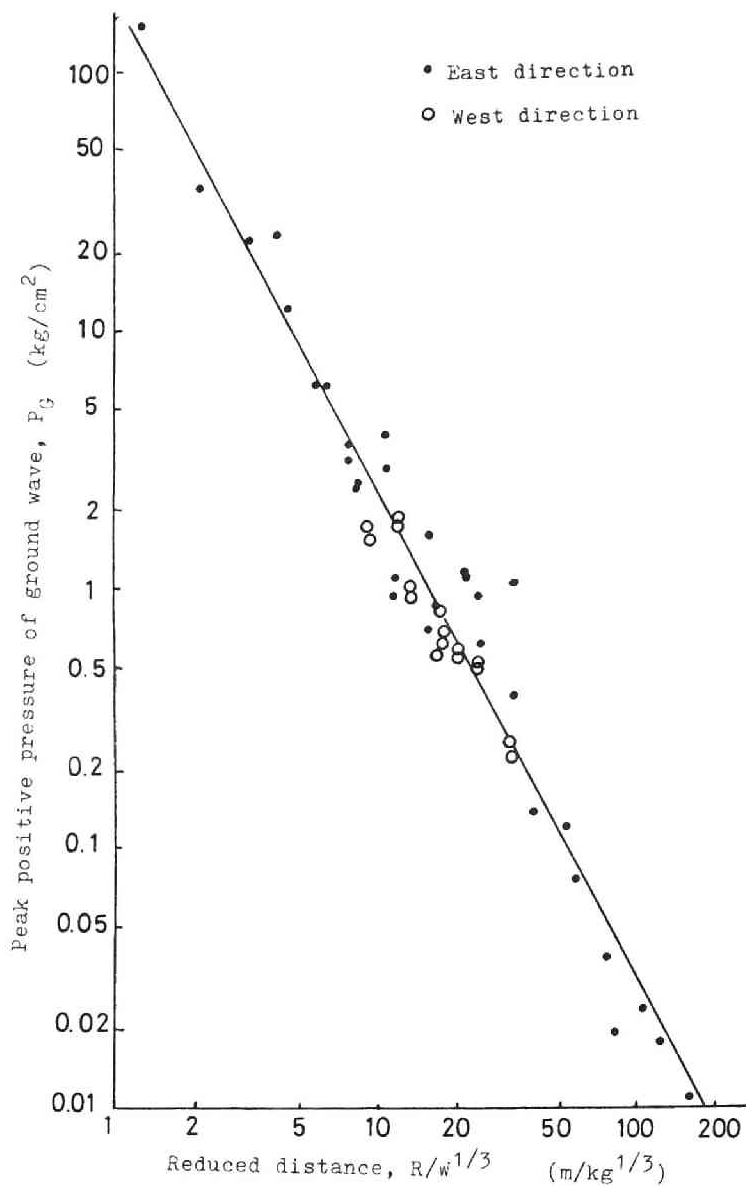


Fig.4.8 Relation between P_G and $R/W^{1/3}$ (4A)

4.4.2 7 A地点の試験爆破

(a) 圧力波形について

Fig. 4.9は、7 A爆破によって得られた水中圧力波形の一例を示したものである。7 A地点における試験爆破によって得られた水中圧力波形においても、4 A地点での試験爆破で得られた圧力波形と同様に、低周波の圧力波と高周波の圧力波とが認められ、低周波の圧力波の方が高周波の圧力波よりも先行して観測されている。また、爆源に近い点では低周波の圧力波が卓越しているが、遠方点では高周波の圧力波の方が卓越している。

Fig.4.10には、起爆後低周波の圧力波の初動が測点に達するまでの時間 t_{GR} と爆破の

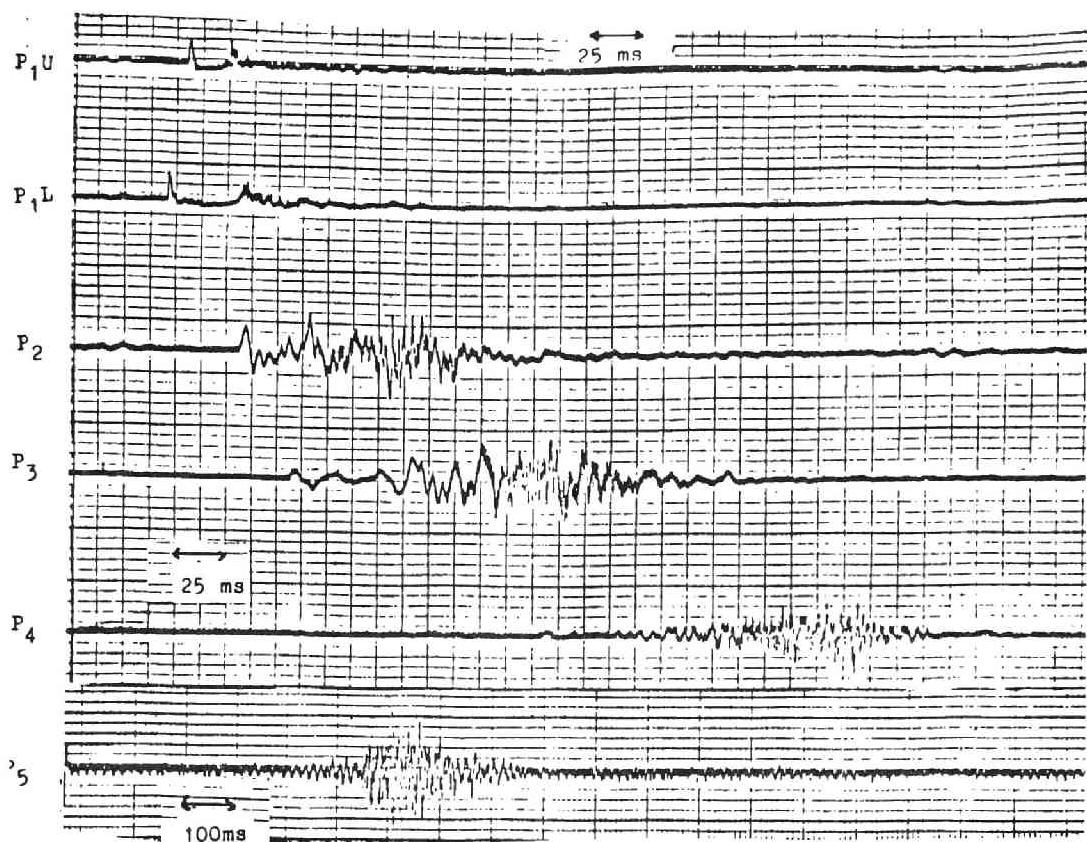


Fig.4.9 Examples of observed wave form (7A-Test No.3)

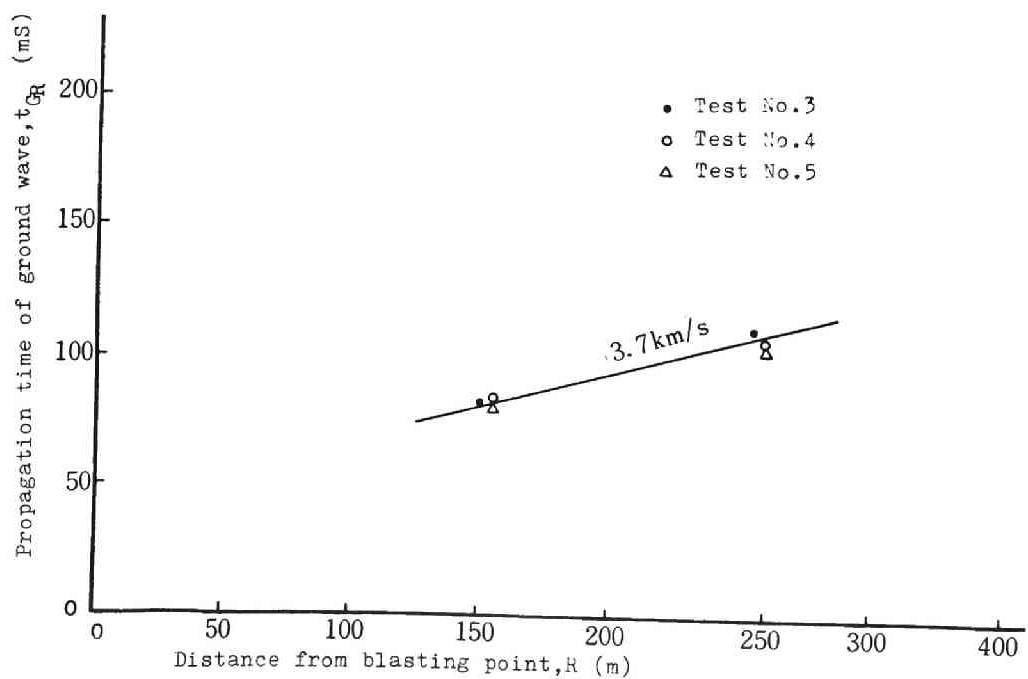


Fig.4.10 Relation between t_{GR} and R . (7A)

中心から測点までの斜距離Rとの関係を示した。すなわち、同一測線上にあるP₂点およびP₃点での測定値を結ぶ直線の勾配は3,700 m/Sである。この値は基盤岩である花崗岩の音速に近い値である。このことから、この低周波の圧力波は基盤岩および堆積層を通して水中へ透過してきた地盤一水圧力波であり、PekerisらのいうGround waveであるとみなすことができる。

一方、高周波の圧力波について、それらの伝播速度を求めてTable 4.5に示したが、それらの値は海水中での音速とほぼ一致している。したがって、測定された高周波の圧力波は海水中を伝播してきたWater waveと見なすことができる。このように海底下3.5m近くに爆源があるような無自由面爆破においてもWater waveが生成することがわかる。

Table 4.5 Propagation velocity of high frequency wave

Test No.	Horizontal distance from blasting point* (m)			Propagation time**(ms)			Propagation velocity (km/s)	
	R ₂	R ₃	R ₄	t ₂	t ₃	t ₄	$\frac{R_3-R_2}{t_3-t_2}$	$\frac{R_4-R_3}{t_4-t_3}$
3	145	240	435	114	180	310	1.44	1.50
4	150	250	420	117	185	300	1.47	1.48
5	145	245	435	119	185	310	1.52	1.52

*R₂, R₃ and R₄ show horizontal distance from blasting points to P₂, P₃, P₄ points respectively.

**t₂, t₃ and t₄ show difference in time between instance of blasting and arrival time of high frequency wave at P₂, P₃ and P₄ points respectively.

(b) 圧力波の大きさについて

第3回、第4回および第5回の段発の実験では、水中圧力波は段ごとに完全に分離して観測された。そこで、各段ごとの爆破により得られた圧力波についてその正圧力部分の最高値P_mを求め、P_mと換算距離R/W^{1/3}（R：爆源から測点までの斜距離、W：薬量）との関係をFig. 4.11に示した。結果はかなりばらついているが、これらの関係を最小自乗法により整理すると、次式に示す関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} P_G &= 1.54 \times 10^3 \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{2.26} \\ P_w &= 11.2 \cdot \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.5} \end{aligned} \right\} \text{----- (4.3)}$$

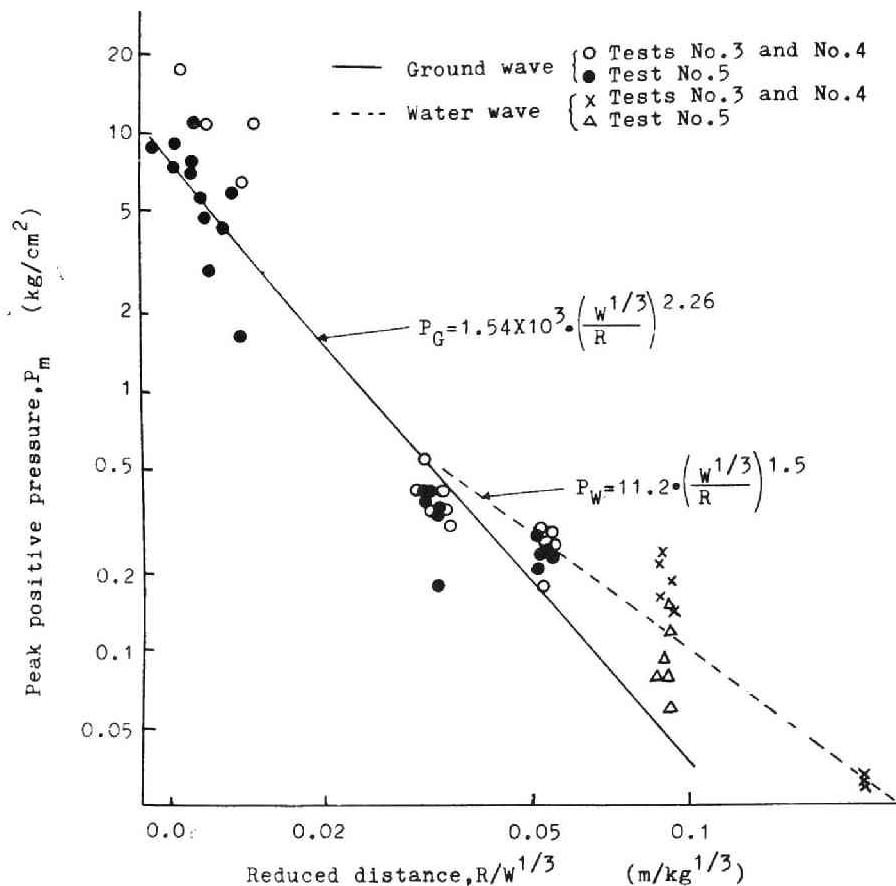


Fig.4.11 Relation between P_m and $R/W^{1/3}$.

ここで、 P_G : Ground wave の正圧最高値 (Kg/cm^2)

P_W : Water wave の正圧最高値 (Kg/cm^2)

R : 爆源からの距離 (m)

この結果、Ground wave の方がWater wave よりも圧力の距離減衰が大きいことがわかる。そのため、爆源に近い P_1 点、 P_2 点ではGround wave が卓越するが、爆源より遠距離にある P_4 点および P_5 点ではWater wave が卓越する。また、Fig. 4.11 に示した測定値はかなりばらつきが大きい、このことは、爆源付近の岩盤の性質が水中圧力波にかなりの影響を及ぼすことを示すものであろう。すなわち、第3回～第5回の実験が実施された段発爆破では、毎回爆源の位置を異にしており、しかもこれらの段発爆破で破壊の対象となった花崗岩は場所によって風化の程度にかなりの差があり、このような岩盤の性質の差異が破壊効果に、ひいては水中圧力波の生成に対して影響を与えたものと考えられる。

くにこの傾向は、第3回および第4回の爆破により生じた破砕圏に近接して実施された第5回爆破の際に得られた水中圧力波の測定値によく現われているものと思われる。

水中圧力波の大きさについて、4 A 爆破と 7 A 爆破のそれぞれについて得られた結果を比較すると、Ground wave, Water wave のいずれについても距離減衰に差が認められる。Ground wave の距離減衰は波動の伝播していく地盤の特性の影響を強く受けるので、4 A 爆破および 7 A 爆破の対象となった地盤の構成状態や特性の違いが両方で観測された Ground wave の距離減衰指数の差異となって現われたものと考えられる。一方、Water wave の距離減衰に差が認められたのは、次のように考えれば説明できる。Water wave は水中に生じた圧力波が水面と水底での反射のくり返しにより、水面は節、水底では腹となるようなモードの圧力波動を形成し、これが水の層を2次元的に伝播することにより生ずるものと考えられる⁴⁾。波動が、エネルギーロスの全くない媒質中を伝播する場合は波動の持つ圧力は距離の0.5乗に反比例する。水はエネルギーロスの非常に小さな媒質であることから、その距離減衰指数は0.5に近い値でなければならないが、実際には4 A 爆破で得られた距離減衰指数は1.1、7 A 爆破の場合のそれは1.5である。このように、距離減衰が大きくなるのは、圧力波の一部が空気中や地盤中に透過するためと考えられる。圧力波の境界面での透過率は界面の両側の媒質の音響インピーダンスの差が小さい程大きい。したがって、圧力波の(Water wave)の空気層への透過率は7 A 爆破の場合も4 A 爆破の場合も差がない。しかし、海底地盤は7 A 爆破では水で飽和した砂礫層であり、4 A 爆破では風化花崗岩であるため、海底地盤の音響インピーダンスは7 A 爆破の方が水のそれに近い。したがって、海底地盤への圧力波(Water wave)の透過率は7 A 爆破の方が4 A 爆破の場合より大きいため、距離減衰指数に差が生じたものと考えられる。

また、Water wave は地盤一水圧力波の1種であるが、これは主に水中を伝播する波動であり、爆源直上付近に発生する水中圧力波の影響も受けているものと考えられる。そのため、一自由面爆破の場合のWater wave の強さは、爆源直上付近で生ずるガス圧力波にも影響されるものと考えられる。

4.4.3 基礎研究との関連

第1編第2章および第3章で述べた水槽実験による基礎研究では、無自由面爆破の場合は地盤一水圧力波が、一自由面爆破の場合はガス圧力波と地盤一水圧力波が生ずることを明らかにした。今回の現場実験でも、無自由面爆破、一自由面爆破のいずれにおいても地盤一水圧力波は観測された。しかし、一自由面爆破である4 A 爆破においてはガス圧力波が観測されなかったが、これは第3章で明らかにしたガス圧力波の方向性から説明することができる。すなわ

ち、4 A 爆破において設置された圧力計の位置は方向角 θ が 90° に近く、ガス圧力波が伝播しない方向にある。さらに、今回の現場実験では Water wave が観測されたが、これは爆源から遠方の観測点で測定される圧力波であり、爆源近傍の圧力波について検討した基礎研究では明らかにすることができなかったものである。

第 4.5 節 結 言

比較的水深の浅い海域における無自由面と一自由面の海底せん孔爆破によって得られた水中圧力波を解析して、次のような点が明らかになった。

- 1) 比較的低周波成分で構成される Ground wave と高周波成分で構成される Water wave の両者が一自由面爆破、無自由面爆破のいずれの場合においても観測された。
- 2) Water wave の方が Ground wave より距離減衰指数が小さいので、爆源に近い領域では Ground wave が卓越して観測されるが、爆源より遠く離れた測点では逆に Water wave が卓越して観測されるようになる。
- 3) Water wave は水中を伝播する波動であるため、伝播経路の途中に島などの障害物があるとその伝播を阻止されるが、Ground wave は地盤中を伝播してきた波動にもとづいて生ずる圧力波であるから、伝播経路中に障害物があっても、ふつうの場合にはその伝播を阻止されることはない。
- 4) 基礎研究の結果から、今回の現場実験では地盤一水圧力波 (Ground wave) の卓越は予想されたが、爆源から遠方で観測される Water wave は爆源近傍の圧力波について検討した基礎研究では予測できなかった圧力波である。

参考文献

- 1) Atlas Copco : Atlas Copco Pub., № 5,170 (1970)
- 2) C.L. Pekeris : The Geological Society of America, MEMOIR
№ 27 (1948)
- 3) I. Papadakis : North Atlantic Treaty Organization Saclant ASW
Research Centre , Technical Report № 187
(1971)
- 4) 早 川 正 己 : 「物理探査」, ラテライズ, P. 112 (1972)

第2篇 水中圧力波による魚類の損傷に関する研究

第1章 水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷

第1.1節 緒 言

水中圧力波を受けて、へい死あるいはけいれん状態となった魚は、その内部器官に著しい損傷が見られる。この問題に関する研究として、古いところでは、稲村¹⁾が火薬類の水中爆発による圧力波を受けた魚の内部器官、とくに聴器の損傷を詳しく調べている。その他にも、水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷を観察した報告はいくつか見られるが²⁾、各内部器官の損傷を水中圧力波の圧力の大きさあるいはへい死率などとの関係で詳しく検討したものは見あたらない。そこで、本章では、水中圧力波を受けた魚の、それぞれの内部器官の損傷程度とへい死率および水中圧力波の圧力最高値との関係について検討した結果について述べる。

第1.2節 実験方法

実験水槽内に固定した供試魚に水中圧力波を加え、供試魚の内部器官の損傷と魚のへい死率について調べた。供試魚を麻酔薬(MS-222)で処理した後、ガーゼで軽く包み、Fig.1.1に示すように段ごとに収容して水槽内に固定した。供試魚には、淡水魚のコイと海産魚のマダイおよびカサゴを使用した。

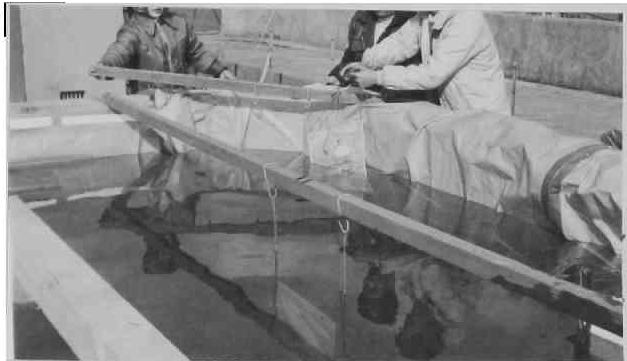


Fig.1.1 Fish paralysed in mesh creel.

淡水魚についての実験は東京大学工学部安全工学実験場の実験水槽(3m×5m×3.5m)を、また海産魚について

の実験は水産庁南西海区水産研究所の水槽(4m×4m×2m)をそれぞれ借用して実施した。実験水槽の全景をFig.1.2に示す。

水中圧力波を発生させる爆源には6号電気雷管の爆発を利用し、電気雷管の数および爆源から供試魚までの距離を調節することにより、供試魚に加わる圧力波の強さをコントロールした。供試魚が受ける水中圧力波の強さを実測するために、供試魚の近傍に水中圧力波計測用の電気石ゲージを設置した。圧力測定方法は第1篇第1章で述べた方法と同じである。

圧力波を受圧した供試魚は直ちに持ち上げ、小型水槽に入れ、麻酔の切れるのを待って遊泳状

態および外見上の損傷状態を観察した。さらに、X線撮影を行ない、骨格の異常を調べた上で解剖し、重要な内部器官（肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓）の損傷状態を観察した。一般に、水中圧力波を受けた魚の内部器官には充血や組織の破裂などの損傷が見られ、心臓では静脈洞が破裂しているものもある。また、損傷の激しい場合には骨格の異常も認められ、頭骨、椎体の破裂や分離あるいは肋骨脱離などが見られた。そこで、内部器官の損傷状態については以下の点に留意して調べることとした。

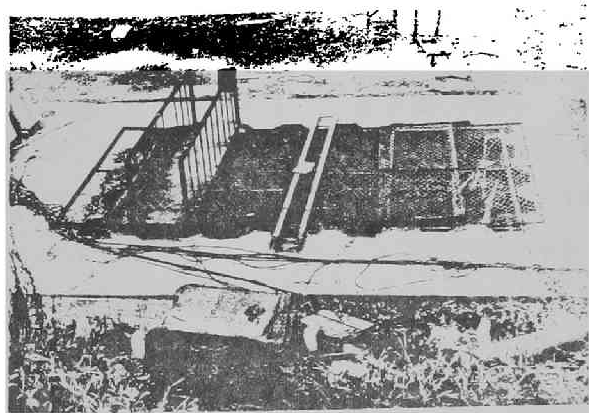
- (1) 肝臓：組織の破裂と血管充血の程度
- (2) 心臓：静脈洞破裂による出血の有無
- (3) うきぶくろ：被膜破裂と血管充血の程度
- (4) 腎臓：組織破裂と血管充血の程度
- (5) 骨格：椎体分離、肋骨脱離の有無

第1.3節 実験結果および考察

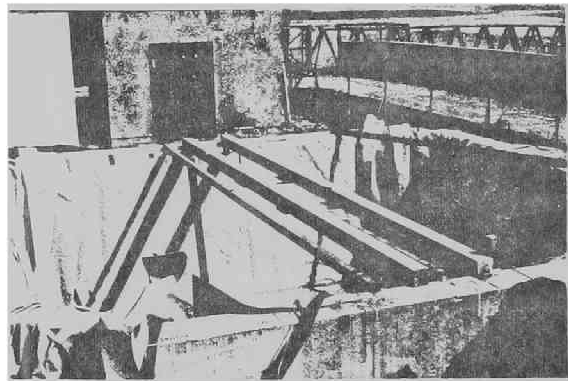
1.3.1 各内部器官の損傷程度と外見上の観察結果との関係

水中圧力波を受けた魚を段かごから取り出し、小型水槽に入れると、底に横臥するもの、けいれん状態で横転するもの、直ちに遊泳するものが見られ、さらに、けいれん状態のもののうちには、横転して遊泳不可能なものと一時的に横転するがしばらくすると遊泳を始めるものが見られた。そこで、底に横臥するものを「へい死」、横転して遊泳不可能なものを「重度のけいれん」、一時的に横転するがしばらくすると遊泳するものを「軽度の異常」、正常に遊泳するものを「生存」と判定した。

ここで、けいれん状態のものの後遺症について明らかにするための予備実験を行なった。その



(Tokyo University)



(The Nansei Regional Research Laboratory)

Fig.1.2 Water tank for experiments.

結果，コイについては，軽度の異常状態であった10尾を2か月間飼育観察したが，すべて正常となった。また，マダイのけいれん状態のもの15尾を1週間飼育観察した結果では，重度のけいれんと判定したものはすべて飼育期間中にへい死し，軽度の異常と判定したものはすべて正常となった。そこで，本研究においては，取り上げ時の観察結果において，「へい死」あるいは「重度のけいれん」と判定されたものを重態魚，「軽度の異常」あるいは「生存」と判定されたものは軽傷魚と呼ぶこととする。

さて，水中圧力波を受けた魚の内部器官の損傷の程度を定量的にあらわすために，水産関係の研究者は「損傷指数」なる量を使用している³⁾。ここでいう「損傷指数」は，内臓諸器官のうち重要と考えられる肝臓，心臓うきぶくろおよび腎臓の4種の臓器の損傷程度を，Table 1.1に

Table 1.1 Conversion rule of injury degree from symptoms observed in main organs.

Injury degree Organ	3	2	1	0
Liver	Destruction of tissue ++ or +++	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	Abnormality not observed
Heart	Rupture of sinus venosus +++~+	Blank	Blank	Abnormality not observed
Air bladder	Destruction of tissue +++~+	Internal haemorrhage +++~+	Congestion +++~+	Abnormality not observed
Kidney	Destruction of tissue ++ or +++	Destruction of tissue +	Congestion +++~+	Abnormality not observed

従って，0，1，2，3の4段階に数量化しておき，つぎにこのようにして数量化した損傷程度の和をもって「損傷指数」とする方法である。ただし，損傷程度の数量化において，0は損傷の見られぬもの，3は最もひどく損傷を受けたもので，これらの両者の中間の損傷を受けていると判断したものを，その程度に応じて1あるいは2と定めている。そこで，本研究においても，魚の内部器官の損傷については，上記のようにして定められた損傷程度あるいは損傷指数をもって表わすことにした。

Table 1.2には水中圧力波を受けた供試魚の内臓諸器官の解剖観察の結果の一例として，最高圧が21.4 kg/cm²の水中圧力波をその腹側部から受けたコイについての解剖観察の結果を示した。また，Table 1.3～Table 1.6には，各供試魚について，各内部器官の損傷程度別に軽傷魚および重態魚として判定した尾数を示した。さらに，これらの表に示した結果にもとづいて損傷程度ごとに軽傷魚と重態魚の尾数の比率を求め，この比率と損傷程度との関係をFig. 1.3に図示した。

Fig. 1.3を参照して，外見上の観察結果と各内部器官の損傷程度の対応関係を整理してみると，以下に示す特徴が認められる。

Table 1.2 Example of symptoms observed on internal organs.
(Carp receiving pressure₂ from lateral direction)
(Peak pressure: 21.4 kg/cm²)

Test fish No.			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Body length (cm)			16.6	16.6	16.4	14.5	17.7	15.3	16.6	17.0	15.2	14.4
Body weight (g)			125	112	122	82	128	80	119	133	89	92
Symptom observed	Liver	Destruction of tissue	-	-	-	-	-	-	-	+	-	+
		Congestion	+	-	+	+	+	+++	++		++	
	Heart	Rupture of sinus venosus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Destruction of tissue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Air bladder	Internal haemorrhage	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
		Congestion	+	+		+	+	-	-	-	+++	
	Kidney	Destruction of tissue	-	+	+	+	+	+	++	+	-	+
		Congestion	+								+++	
Initial observation just after explosion*			N	N	N	N	N	N	N	N	N	SL

*N: Normal in appearance, SL: Slightly injured, SE: Seriously injured,
D: Dead on first inspection

Table 1.3 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of carp.

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
533	Liver	0	21	21	0
		1	456	382	74
		2	48	18	30
		3	8	0	8
	Heart	0	488	421	67
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	45	0	45
	Air bladder	0	229	200	29
		1	156	145	11
		2	77	63	14
		3	71	13	58
	Kidney	0	71	67	4
		1	122	117	5
		2	221	195	26
		3	119	42	77

Table 1.4 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of sea bream (8 months old).

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
157	Liver	0	20	18	2
		1	113	84	29
		2	21	5	16
		3	3	0	3
	Heart	0	157	107	50
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	0	0	0
	Air bladder	0	90	80	10
		1	35	24	11
		2	23	3	20
		3	9	0	9
	Kidney	0	122	91	31
		1	24	15	9
		2	11	1	10
		3	0	0	0

Table 1.5 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of sea bream (2 years old)

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
48	Liver	0	18	18	0
		1	22	16	6
		2	8	0	8
		3	0	0	0
	Heart	0	45	34	11
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	3	0	3
	Air bladder	0	24	24	0
		1	11	9	2
		2	4	1	3
		3	9	0	9
	Kidney	0	32	30	2
		1	11	2	9
		2	4	2	2
		3	1	0	1

Table 1.6 Number of the slightly damaged and seriously damaged fish in the injury degrees of scorpionfish

Number of fish	Organ	Injury degree	Number of fish	Number of slightly damaged fish	Number of seriously damaged fish
48	Liver	0	3	3	0
		1	31	19	12
		2	14	6	8
		3	0	0	0
	Heart	0	46	28	18
		1	—	—	—
		2	—	—	—
		3	2	0	2
	Air bladder	0	12	12	0
		1	24	16	8
		2	11	0	11
		3	1	0	1
	Kidney	0	12	12	0
		1	16	9	7
		2	14	6	8
		3	6	1	5

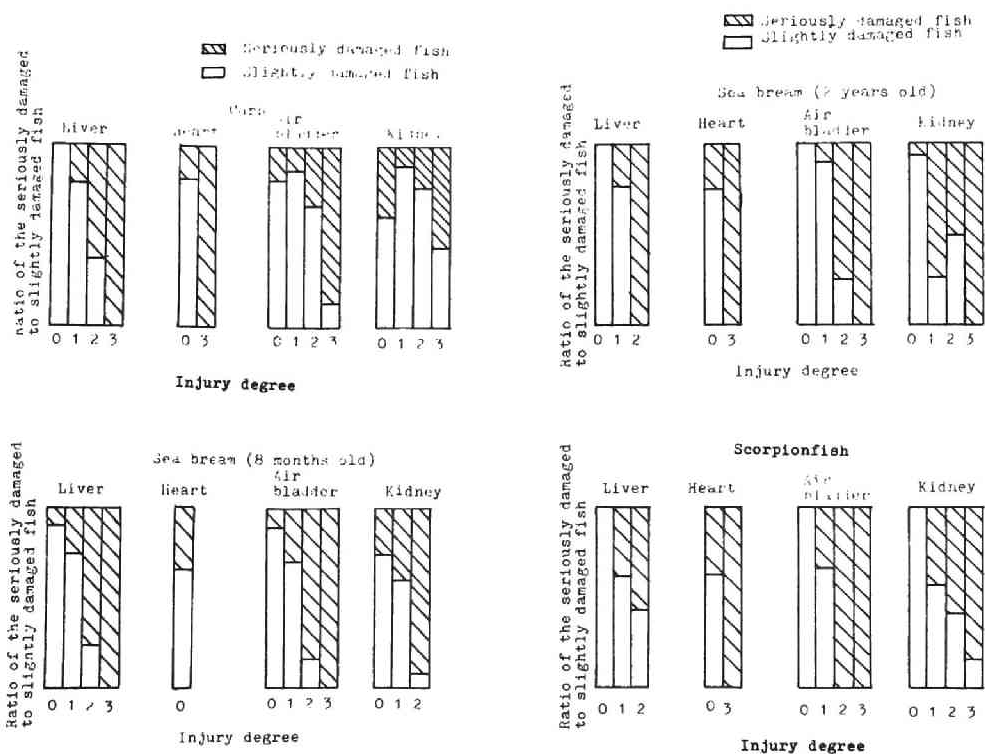


Fig.1.3 Relation between injury degree and ratio of the seriously damaged to slightly damaged fish.

まず、心臓については、魚種に関係なく、損傷程度3のものはすべて重態魚となっている。心臓の場合、損傷程度3のものについてはすべて静脈洞破裂が観察されており、したがって、静脈洞破裂は魚にとって致命的な損傷であることがわかる。

つぎに、他の器官でも、損傷程度3となっているものは大部分は重態魚であり、とくに、コイの肝臓、マダイ当才魚の肝臓とうきぶくろ、マダイ2才魚のうきぶくろと腎臓、カサゴのうきぶくろの各器官では、損傷程度が3のものは100%重態魚となっており、コイのうきぶくろ、マダイ当才魚の腎臓やカサゴの腎臓についても損傷程度3のものは大部分が重態魚である。このように、肝臓、心臓、うきぶくろあるいは腎臓などの内部器官が水中圧力波によって著しい損傷を受けた場合には、そのほとんどが重態魚になっていることから、これらの内部器官は魚にとって損傷を受けやすいきわめて重要な器官であると考えられる。ただし、コイの腎臓は例外で、損傷程度が3でも約35%が軽傷魚となっているが、このことはコイにとっては腎臓に生ずる著しい損傷が必ずしも致命傷とはなっていないことを示しており、このように魚種によっては例外的な結果を示すものも見られることに注意しなければならない。

なお、今回の実験結果においては、骨格の損傷はほとんど見られず、わずかにマダイ2才魚の2尾、カサゴの2尾のみに肋骨脱離が少し見られた程度である。したがって、骨格は他の内部器官にくらべて水中圧力波に対する抵抗力がかなり強いことがわかる。

1.3.2 水中圧力波の強さと各内部器官の損傷程度との関係

Table 1.7には、各内部器官に生じた損傷程度を、与えた水中圧力波の強さごとに平均し

Table 1.7 Injury degree of the main internal organs

Species of fish	P.P* (kg/cm ²)	N.F.**	Injury degree							
			Liver		Heart		Air bladder		Kidney	
			Mean	S.D.***	Mean	S.D.***	Mean	S.D.***	Mean	S.D.***
Carp	16.9	40	0.73	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.46
	21.4	40	0.95	0.22	0.00	0.00	0.20	0.41	0.47	0.51
	26.6	40	1.03	0.16	0.00	0.00	0.65	0.48	1.00	0.72
	34.1	40	1.08	0.27	0.00	0.00	1.13	0.46	1.68	0.62
	42.8	40	1.03	0.16	0.08	0.47	1.38	0.67	2.05	0.60
	60.0	40	1.03	0.16	0.08	0.47	2.03	0.83	2.38	0.74
	66.0	40	1.18	0.39	0.68	1.27	2.28	0.85	2.23	0.48
Sea bream (8 months old)	3.32	38	0.76	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6.95	40	0.93	0.42	0.00	0.00	0.25	0.54	0.10	0.38
	11.3	39	1.13	0.57	0.00	0.00	1.10	0.91	0.36	0.67
	16.0	40	1.28	0.55	0.00	0.00	1.48	1.01	0.55	0.75
Sea bream (2 years old)	17.3	5	1.00	0.71	0.00	0.00	1.00	1.41	0.00	0.00
	19.5	10	1.10	0.57	0.30	0.95	1.20	0.92	0.70	1.16
	31.4	8	1.63	0.52	0.38	1.06	2.88	0.35	1.00	0.00
	12.1	16	1.19	0.54	0.00	0.00	0.63	0.50	0.81	0.98
Scorpionfish	21.9	16	1.19	0.54	0.38	1.03	0.88	0.81	1.06	0.77
	36.6	16	1.31	0.60	0.00	0.00	1.56	0.63	2.00	0.82

*P.P.:Peak pressure of pressure wave

**N.F.:Number of fish

***S.D.:Standard deviation

た値とその標準偏差を示した。なお、この実験では、マダイ2才魚以外は、供試魚の受圧方向を腹部、腹側部、頭部および尾部とした場合について測定を行なったので、これらの実験で得られたすべてのデータを平均した値をTable 1.7に示した。ただし、マダイ2才魚については水中圧力波を腹側部から与えた実験のみを行なったので、Table 1.7のマダイ2才魚の欄には、腹側部から受圧した場合について得られたデータの平均値を示した。また、Fig. 1.4には、水中圧力波の圧力最高値と各内部器官の損傷程度の平均値との関係を示した。

Fig.1.4にみられるように、水中圧力波の強さと魚の各内部器官に生ずる損傷程度との関係は、魚種によって差があることがわかる。たとえば、コイやカサゴでは、うきぶくろにくらべて

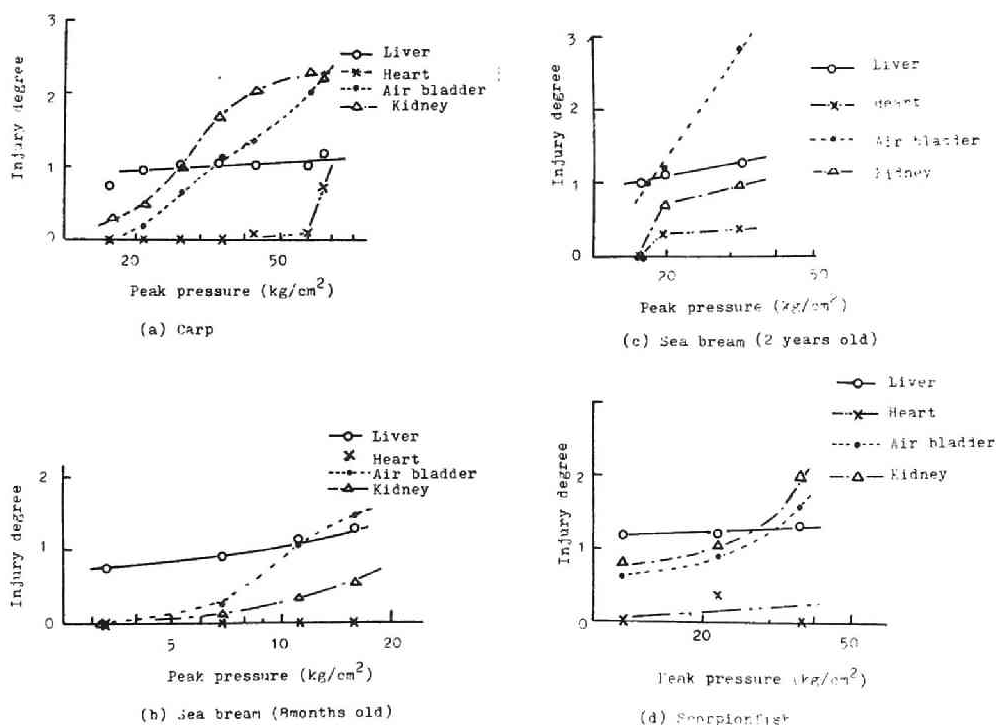
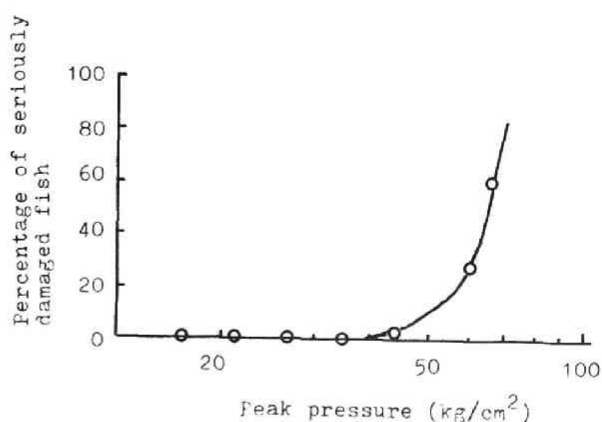


Fig.1.4 Relation between injury degree and peak pressure of pressure wave.

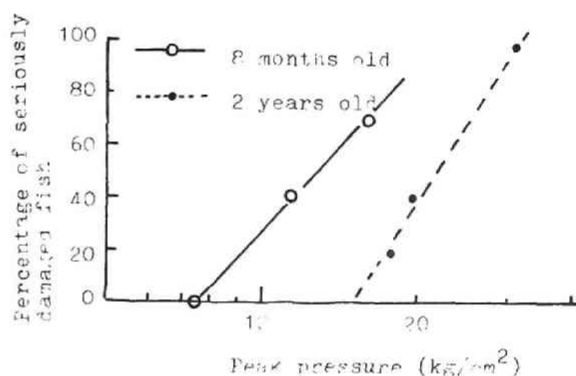
腎臓の損傷の方が大きい、マダイでは、腎臓にくらべてうきぶくろの損傷の方が大きい。一方、すべての魚種について共通している特徴としてはつぎの2点があげられる。すなわち、その1つは、圧力波の強さが増加しても肝臓の損傷程度の増加する割合は比較的小さいが、うきぶくろや腎臓の損傷程度は圧力波の強さが強くなるにつれて急激に大きくなることである。そのため、魚が受ける水中圧力波の強さが小さい場合には、肝臓の損傷が他の器官にくらべて大きい、圧力波の強さが大きくなると、腎臓やうきぶくろに生ずる損傷が大きくなる。各魚種に共通して認められる他の1つの特徴は、圧力波の強さの大小に拘わらず一般に心臓の損傷程度が極めて小さいことである。

Fig.1.5は、重態魚の出現率と水中圧力波の強さとの関係を示したものであるが、この図によると、急激に重態魚の出現率が増加しはじめる水中圧力波の限界圧力値は、コイでは40~60 kg/cm^2 、マダイの当才魚では7~8 kg/cm^2 、マダイの2才魚では15~17 kg/cm^2 、カサゴでは18~19 kg/cm^2 となっており、魚種によって限界圧にかなりの差があることがわかる。

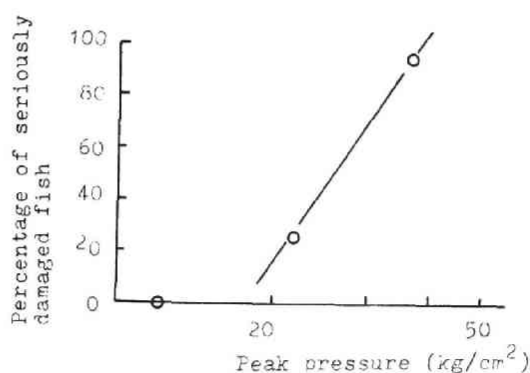
以上の結果を整理すると、供試魚



(a) Carp



(b) Sea bream



(c) Scorpionfish

Fig. 1.5 Relation between percentage of seriously damaged fish and peak pressure of pressure wave.

に加わる水中圧力波の強さが比較的小さい時は、心臓、うきぶくろ、腎臓および骨格の損傷はなく、肝臓に多少の損傷が見られるが、致命的なものではない。ところが圧力波の強さがある値を超えると、うきぶくろおよび腎臓の損傷が急激に増加し、これが致命傷となって重態魚の出現率が増加するようになる。供試魚に加わる水中圧力波の強さがさらに増加すると、心臓および骨格にも損傷があらわれるようになる。

重態魚が出現するか否かの限界圧力値は魚種によって差があり、今回の実験に用いた供試魚では、水中圧力波に対してもっとも抵抗力をもっているのがコイで、マダイがもっとも抵抗力が小さかった。また、当才魚は成魚にくらべて水中圧力波に対する抵抗力が小さいということもわかった。

今回の実験で明らかにしたような、水中圧力波による魚類の各内部器官の損傷の特徴は、重態魚が出現するか否かの限界付近の強さの水中圧力波が魚類に作用した時に見られるものであって、これより、さらに強い圧力波が加わるとすべての内部器官に著しい損傷があらわれ、ひどい場合には魚の内臓部が脱離するようなこともある⁴⁾。また、逆に水中圧力波の強さが極めて小さい時は、当然のことながら魚の内部器官には全く損傷はあらわれない。

第1・4節 結 言

本章では、水中圧力波を受けた魚の各内部器官に生ずる損傷の程度と重態魚の出現率との関係、および魚に加わる水中圧力波の強さと魚の各内部器官の損傷程度との関係について検討した。その結果、以下に示す事柄を明らかにすることができた。

1) 魚にとっては、肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓等の内臓器官は重要な器官であり、水中圧力波によりこれらの器官が著しく損傷を受けると、魚は重態魚となり、正常状態には快復しない。

2) 魚に加わる水中圧力波の強さが比較的小さい時には、心臓、うきぶくろ、腎臓ならびに骨格には損傷は見られないが、肝臓には多少の損傷を生ずるようになる。水中圧力波の強さが大きくなり、ある値を越えると、うきぶくろや腎臓の損傷程度が急激に増加し、その結果重態魚の出現率が増加する。さらに強い圧力波を魚が受けると、心臓や骨格にも損傷が見られるようになる。

3) 水中圧力波を受けた場合に重態魚が出現するか否かの限界圧力値は魚種によって差がある。また、当才魚は成魚にくらべて、一般に水中圧力波に対する抵抗力が小さい。

参 考 文 献

- 1) 稻村兵助：東北医学雑誌，31-3，P.227（1942）
- 2) たとえば，黒木敏郎，九万田一己：北大水産彙報，12-1，P.16（1961）
- 3) 本州四国連絡橋公団，安全工学協会：水中発破による衝撃圧等報告書，P.160（1972）
- 4) 運輸省第3港湾建設局：来島海峡地質調査報告書（水中発破による施工法），P.72（1969）

第2章 魚類の損傷と水中圧力波の受圧方向との関係

第2.1節 緒 言

水中圧力波による魚類の内部器官の損傷は、水中圧力波の伝播方向に対する魚の向きによって影響を受けることが考えられる。そこで、本章では、水中圧力波の受圧方向が魚類の損傷に対してどのような影響を及ぼすかについて検討するために、麻酔をかけた魚を水槽内に固定し、これらに種々の方向から水中圧力波を与え、その結果内部器官にどのような損傷が生ずるかについて調べた。供試魚には、実験上の都合で主に淡水魚のコイを用いたが、一部の実験には、海産魚のマダイとカサゴを併用した。

第2.2節 実験方法

今回は魚類が、頭部、尾部、腹部あるいは腹側部から水中圧力波を受けたそれぞれの場合に応じて、魚類に生ずる損傷の程度がどのように異なるかについて検討した。

供試魚には、前述のように、淡水魚としてはコイを、海産魚としてはマダイ、カサゴを用いた。これらのうち、コイは水産庁淡水区水産研究所で養成した1年生魚および2年生魚であり、マダイは当才魚および2才魚を使った。また、カサゴは大きさができるだけ揃った成魚を使用した。

第1章に述べた実験と同様、淡水魚についての実験は東京大学工学部安全工学実験場の実験水槽を、また海産魚についての実験は水産庁南西海区水産研究所の水槽をそれぞれ借用して実施した。

水中圧力波を発生させる爆源としては6号電気雷管を使用し、要求される圧力の大きさに応じてこれらを1～4本束ねて実験に供した。また、電気雷管1本でも、生ずる水中圧力波の圧力が大きすぎる時は、Fig.2.1に示すように、電気雷管の周囲に発泡スチロールを巻きつけて圧力の大きさが小さくなるように工夫した。この場合、それぞれの爆源を用いて得られる水中圧力波の波形はFig.2.2に示すとおりで、裸の電気雷管を用いた場合と発泡スチロールを巻いたそれを用いた場合とでは、それぞれの圧力波形がほとんど類似しているので、実験結果に及ぼす圧力波形の影響の点からは問題はないと考える。

一方、あらかじめ麻酔薬MS-222を用いて麻酔させた供試魚をガーゼで包み、Fig.1.1

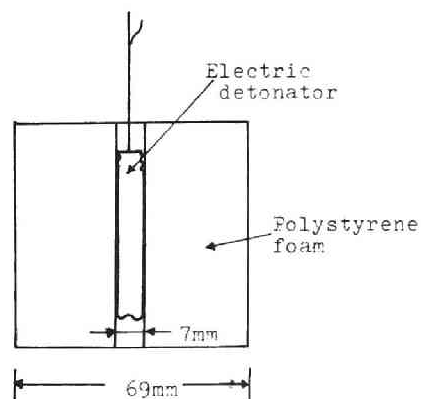
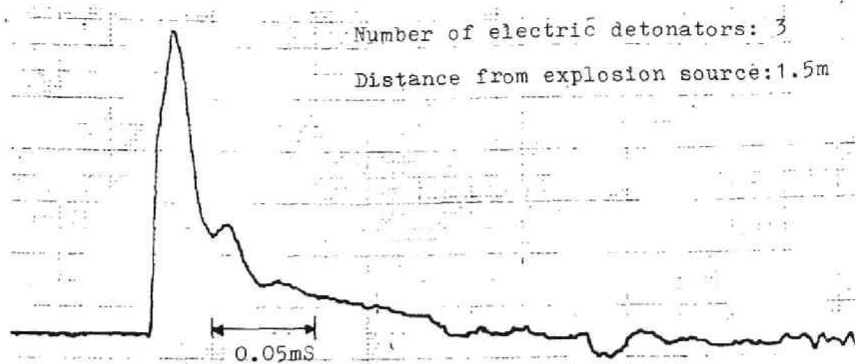
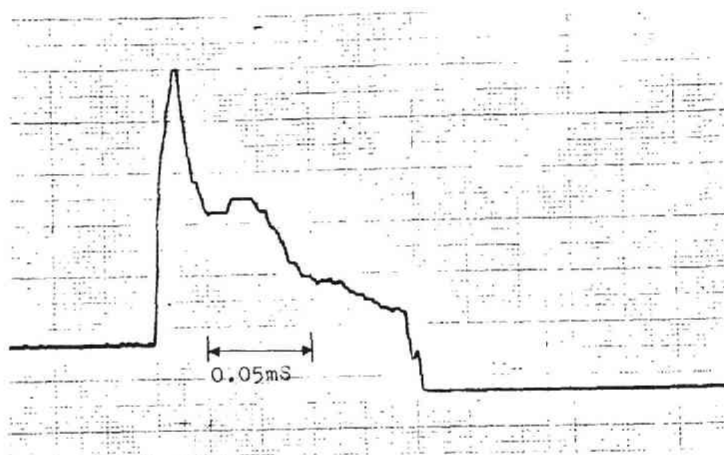


Fig.2.1 Structure of an explosion source which produced weak pressure wave.

に示した段か
ご内に固定し、
これを水中の、
所定の位置に
設置した。こ
の方法によれ
ば、水中圧力
波に対し希望
する方向に供
試魚をしま
り固定するこ
とができる。
また、供試魚
から所定の距
離を離して爆
源を設置した。
なお、爆源お
よび供試魚を
設置する位置
は水深の中央
部を選び、水
面や水底から
の反射波の影
響をできるだ
け少なくする



(a) Naked electric detonator



(b) Electric detonator wrapped with polystyrene foam

Fig.2.2 Typical pressure-time curve of pressure wave caused by underwater explosion of naked electric detonators and an electric detonator wrapped with polystyrene foam.

ように配慮した。さらに、供試魚と同じ位置に電気石ゲージを設置して、供試魚の位置における圧力測定を行なった。圧力測定の方法は、第1篇第1章で述べた方法と同じである。上記のような、爆源、供試魚および電気石ゲージの配置をFig.2.3に示す。

爆発後、直ちに電圧方向群ごとに供試魚を取り出し、小型水槽に入れて生死を判別し、即死以外の魚は遊泳状態を観察した後、外見上の損傷状態を調べた上で解剖し、以下の観点に注意しつつ内部器官の損傷状態を調べた。

- 1) 消化器：胃、腸および幽門垂の充血の程度

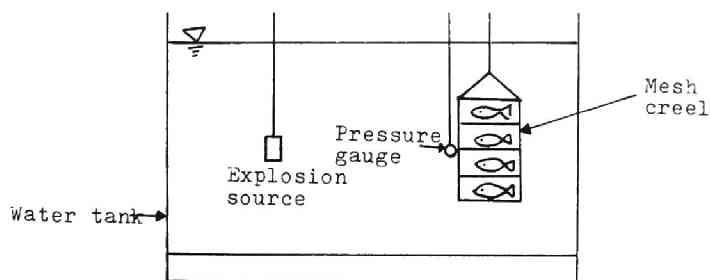


Fig.2.3 Arrangement of explosion source, pressure gauge and mesh creel.

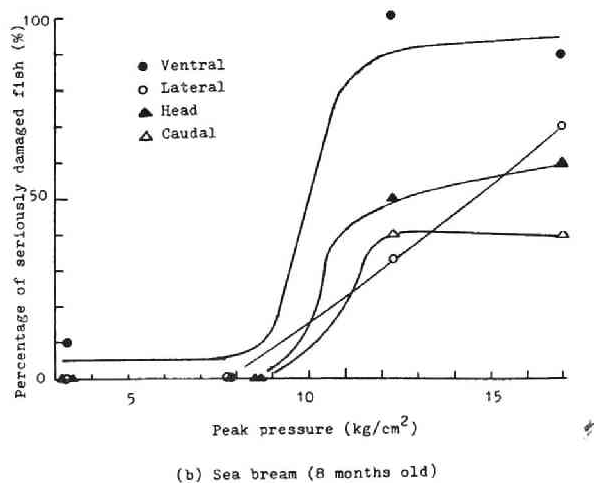
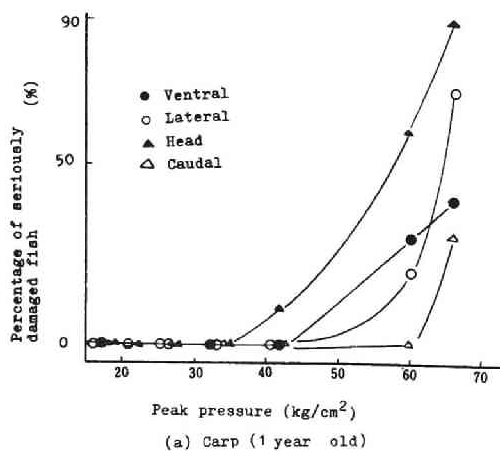


Fig.2.4 Relation between percentage of seriously damaged fish and peak pressure of underwater pressure wave.

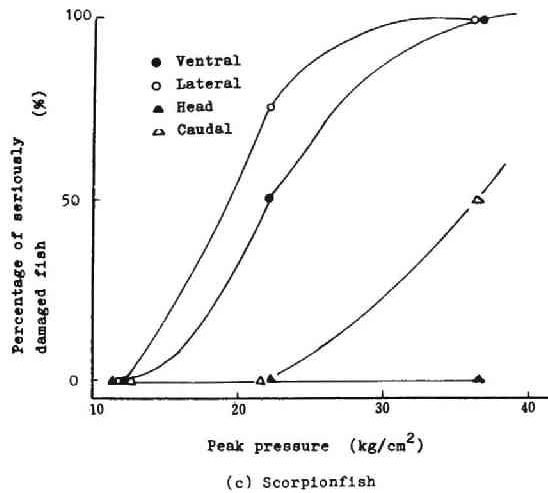


Fig.2.4 Continued.

- 2) 肝 臓：組織破裂と血管充血の程度
- 3) 心 臓：静脈洞破裂による出血の有無
- 4) うきぶくろ：被膜破裂，内出血，血管の充血の程度
- 5) 腎 臓：組織破裂と血管の充血の程度
- 6) 骨 格：X線撮影による骨格の損傷の程度の調査

第2.3節 実験結果および考察

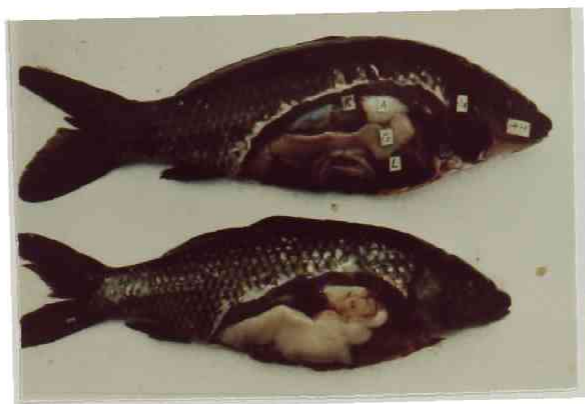
2.3.1 重態魚の出現率について

水中圧力波を受圧した魚を取り上げ，小型水槽の中に入れ，遊泳状態を観察した結果から得られた重態魚の出現率と，水中圧力波の圧力最高値との関係を整理して示すと，Fig.2.4に示すようなほぼS字型の曲線で示される。

これらの結果から，魚のへい死に対する水中圧力波の限界圧の大きさを推定することができるが，今回の実験結果にも，この限界圧の大きさが魚種によってかなり異なることが明瞭に示されており，マダイ当才魚の限界圧がもっとも小さく，つづいてカサゴ，1年生コイの順に限界圧が大きくなっている。また，同一種の水魚についても，限界圧の大きさは受圧方向によって異なり，1年生コイでは頭部＞腹部＞腹側部＞尾部の順に，マダイ当才魚では腹部＞腹側部＞頭部＞尾部の順に，カサゴでは腹側部＞腹部＞尾部＞頭部の順にそれぞれ限界圧が変化している。

2.3.2 各内部器官の損傷程度

水中圧力波を受圧した魚の内臓の状態を示す写真例をFig. 2.5に示す。また，各供試魚の損傷程度をTable 1.1に示した基準にもとづいて数値化し，供試魚の種類別に，受圧方向と損傷程度との関係を整理して示すとTable 2.1に示すようになる。ただし，Table 2.1においては，



A:Air bladder G:Genitals H: Heart
K:Kidney L:Liver

Fig.2.5 Examples showing the injury of internal organs of fishes caused by underwater pressure wave.

Table 2.1(1) Injury degree of each internal organ of fish (1)
Carp(1 year old)

Direction*	I.**	Injury degree						
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
Ventral	L	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	H	0	0	0	0	0	0	0
	A	0	0.6	0.9	1.6	1.6	2.0	2.4
	K	0.6	0.9	1.7	2.0	2.4	2.8	2.5
Lateral	L	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.4
	H	0	0.3	0	0	0	0	0
	A	0	0.8	1.0	1.0	1.5	2.3	2.7
	K	0.6	2.0	0.9	1.6	2.3	2.4	2.3
Head	L	0.3	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
	H	0	0	0	0	0.3	0.3	2.4
	A	0	0	0.4	0.9	1.4	2.1	2.0
	K	0.3	0.8	0.4	1.7	1.9	2.5	2.0
Caudal	L	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	H	0	0	0	0	0	0	0.3
	A	0	0	0.3	1.0	1.0	1.7	2.0
	K	0.6	0.2	1.0	1.4	1.6	1.4	2.1

*Direction of pressure exerted on fish.

**Internal organ.

L:Liver H:Heart A:Air bladder K:Kidney

Table 2.1(2) Injury degree of each internal organ of fish (2)
Carp (2 years old)

Direction*	I.**	Injury degree				Direction*	I.**	Injury degree			
		No.1	No.2	No.3	No.4			No.1	No.2	No.3	No.4
Head	D	1.0	0	1.0	1.0	Ventral	D	1.0	0.5	1.0	1.0
	L	2.3	0.5	1.5	2.0		L	1.0	0.5	1.0	1.5
	H	2.4	0	3.0	3.0		H	0.5	0	0	1.5
	A	0	0	0	3.0		A	1.2	0	2.0	2.0
	K	1.8	0	1.5	2.0		K	2.8	3.0	3.0	3.0
Caudal	D	0.8	0	0.5	0.5	Lateral	D	0.9	0	1.0	1.0
	L	1.2	0	0.5	2.0		L	1.6	1.5	1.5	3.0
	H	0	0	0	1.5		H	1.9	0	1.5	0
	A	0	0	0	2.0		A	0	0	2.0	3.0
	K	1.4	0.5	1.0	1.5		K	0.4	2.0	1.5	3.0

* Direction of pressure exerted on fish.

**Internal organ.

D:Digestive organ L:Liver H:Heart A:Air bladder K:Kidney

Table 2.1(3) Injury degree of each internal organ of fish(3)

Sea bream (8 months old)

Direction*	I.**	Injury degree					Direction*	I.**	Injury degree				
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Lateral	D	0.4	1.4	-	1.3	1.2	Head	D	0.4	-	0.7	1.2	1.3
	L	0.9	1.1	-	1.8	1.5		L	0.6	-	0.8	1.3	1.3
	H	0	0	-	0	0		H	0	-	0	0	0
	A	0	0.3	-	1.1	1.6		A	0	-	0	1.0	1.1
	K	0	0	-	0.2	0.3		K	0	-	0	0.1	0.2
	B	0	0	-	0	0		B	0	-	0	0	0
Ventral	D	0.6	1.0	-	1.5	1.9	Caudal	D	0.1	-	0.4	0.9	1.0
	L	1.2	1.2	-	1.5	2.1		L	0.8	-	0.8	0.7	0.9
	H	0	0	-	0	0		H	0	-	0	0	0
	A	0	0.7	-	1.6	2.1		A	0	-	0	0.6	1.0
	K	0	0.4	-	0.8	1.4		K	0	-	0	0.3	0.3
	B	0	0	-	0	0		B	0	-	0	0	0

*Direction of pressure exerted on fish.

**Internal organ

D:Digestive organ L:Liver H:Heart A:Air bladder K:Kidney B:Bone

Table 2.1(4) Injury degree of each internal organ of fish(4)

						Sea bream (2 years old)					
Direction*	I.O.**	Injury degree				Direction*	I.O.**	Injury degree			
		No.1#	No.2	No.3	No.4			No.1	No.2	No.3	No.4
Lateral	D	0.3	1.4	1.6	2.3	Head	D	-	1.2	-	-
	L	0.1	1.0	1.1	1.8		L	-	0.6	-	-
	H	0	0	0.3	0.4		H	-	0	-	-
	A	0.1	1.0	1.2	2.9		A	-	0.4	-	-
	K	0	0	0.7	1.0		K	-	0.4	-	-
	B	0	0	0	0		B	-	0	-	-
Ventral	D	-	0.6	-	-	Caudal	D	-	1.2	-	-
	L	-	1.0	-	-		L	-	0.2	-	-
	H	-	0	-	-		H	-	0	-	-
	A	-	0.6	-	-		A	-	0.2	-	-
	K	-	1.0	-	-		K	-	0.2	-	-
	B	-	0	-	-		B	-	0	-	-

*Direction of pressure exerted on fish.

**Internal organ

D:Digestive organ L:Liver H:Heart A:Air bladder K:Kidney B:Bone

Explosion source:Powder 3g

Table 2.1(5) Injury degree of each internal organ of fish (5).

Scorpionfish									
Direction*	I.**.	Injury degree			Direction*	I.**.	Injury degree		
		No.1	No.2	No.3			No.1	No.2	No.3
Lateral	D	1.8	1.8	2.0	Head	D	1.3	1.3	2.0
	L	2.0	1.8	1.5		L	0.8	1.3	1.3
	H	0	0	0		H	0	0	0
	A	0.5	1.8	1.8		A	0.5	0	1.5
	K	0.5	0.8	1.5		K	0.5	0.5	1.5
	B	0	0	0		B	0	0	0
Ventral	D	1.0	2.0	2.0	Caudal	D	1.3	1.8	2.0
	L	1.5	1.3	1.5		L	1.3	0.8	1.3
	H	0	1.1	0		H	0	0	0
	A	0.8	1.3	1.8		A	1.0	0.5	1.5
	K	2.0	1.4	3.0		K	0.3	1.5	2.0
	B	0	0	0		B	0	0	0

*Direction of pressure exerted on fish.

**Internal organ

D:Digestive organ L:Liver H:Heart A:Air bladder K:Kidney B:Bone

損傷程度は数値化した場合の平均値で示した。なお、Table 1.1には消化器および骨格の損傷程度の数値化の基準は示していないので、次に示しておく。

○消化器：幽門垂充血と腸管充血の損傷の合計が+4以上……損傷程度3

幽門垂充血と腸管充血の損傷の合計が+2～+3……損傷程度2

幽門垂充血と腸管充血の損傷の合計が+1……損傷程度1

異常なし……損傷程度0

○骨格：椎体分離+1以上または肋骨脱離+3……損傷程度3

Table 2.2 Peak pressure of underwater pressure wave measured and number of test fish used on each test.

Test No.			1	2	3	4	5	6	7
Carp (1 year old)	P_m (kg/cm ²)		16.9	21.0	26.6	34.1	42.8	60.0	66.0
	Number of test fish	V	10	10	10	10	10	10	10
		L	10	10	10	10	10	10	10
		H	10	10	10	10	10	10	10
		C	10	10	10	10	10	10	10
Carp (2 years old)	P_m (kg/cm ²)		27.8	19.4	29.7	37.6	-	-	-
	Number of test fish	V	6	2	2	2	-	-	-
		L	8	2	2	2	-	-	-
		H	10	2	2	2	-	-	-
		C	5	2	2	2	-	-	-
Sea bream (8 months old)	P_m (kg/cm ²)		3.3	7.0	7.6	11.3	16.0	-	-
	Number of test fish	V	10	10	-	10	10	-	-
		L	8	10	-	9	10	-	-
		H	10	-	10	10	10	-	-
		C	10	-	10	10	10	-	-
Sea bream (2 years old)	P_m (kg/cm ²)		0.4*	17.3	19.5	31.4	-	-	-
	Number of test fish	V	-	5	-	-	-	-	-
		L	10	5	10	8	-	-	-
		H	-	5	-	-	-	-	-
		C	-	5	-	-	-	-	-
Scorpion-fish	P_m (kg/cm ²)		12.1	21.9	36.6	-	-	-	-
	Number of test fish	V	4	4	4	-	-	-	-
		L	4	4	4	-	-	-	-
		H	4	4	4	-	-	-	-
		C	4	4	4	-	-	-	-

*Explosion source: Powder 3g

P_m : Peak pressure of underwater pressure wave
V: Ventral L: Lateral H: Head C: Caudal

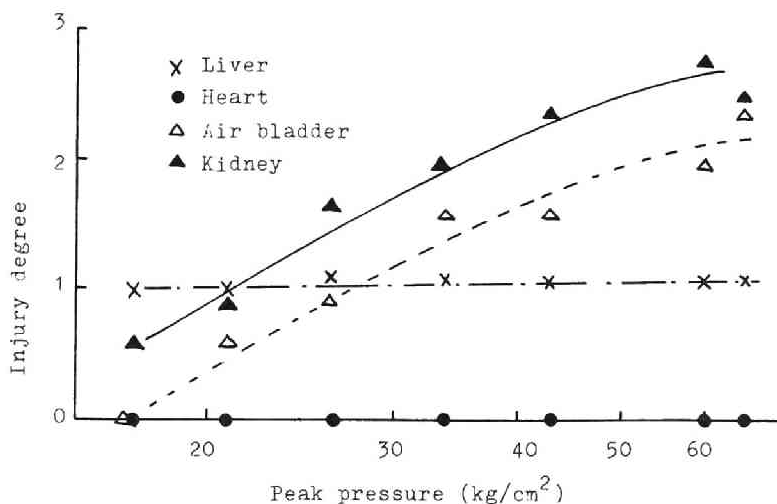
肋骨脱離+2 損傷程度 2

肋骨脱離+1 損傷程度 1

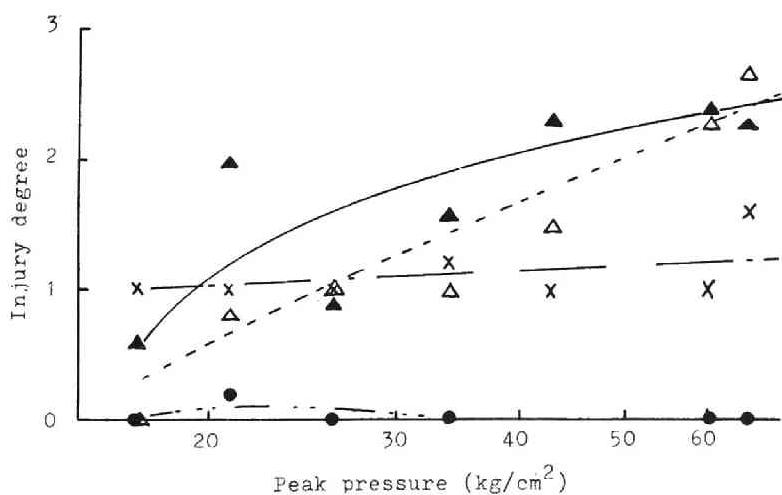
異常なし 損傷程度 0

また、各回の実験で使用した供試魚の尾数と測定された水中圧力波の圧力最高値を Table 2.2 に示す。

上記の結果をもとにして、魚の各内部器官の損傷程度と圧力最高値との関係を図示すると、



(a) Ventral



(b) Lateral

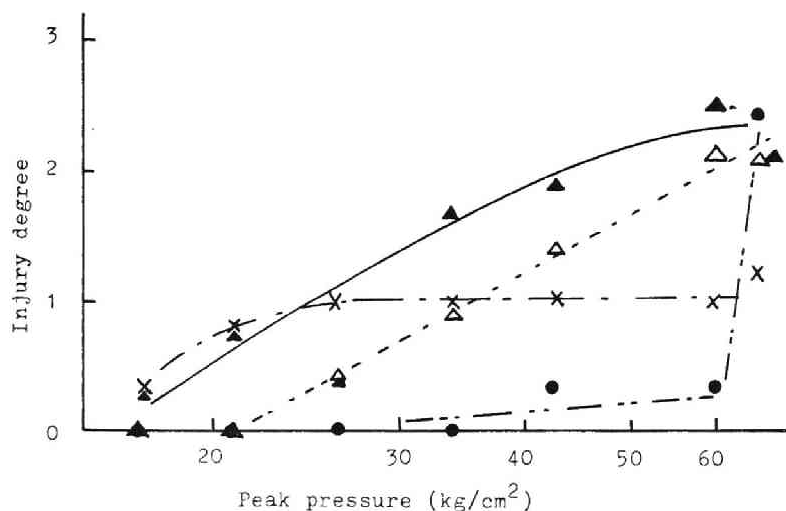
Fig.2.6(1) Relation between injury degree and peak pressure. (Carp, 1 year old)

Fig.2.6に示すとおりである。Fig.2.6に示した結果について、魚種別に認められる特徴を整理して示すと、以下のようなになる。

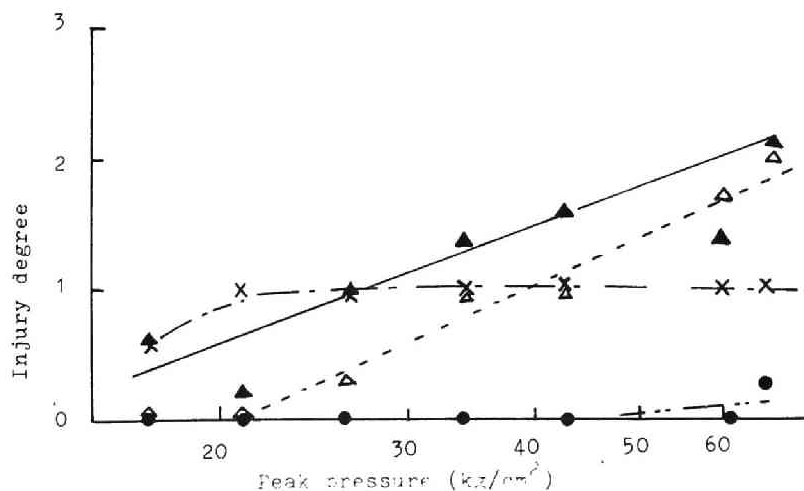
1) 1年生コイ

1) 腹部から受圧したもの

今回の実験で与えた圧力値の範囲では、肝臓の損傷程度は圧力値に無関係にほぼ一定であり、心臓については全く損傷は見られなかった。一方、うきぶくろおよび腎臓の損傷程度は圧力値の



(c) Head



(d) Caudal

Fig.2.6(2) Relation between injury degree and peak pressure
(Carp, 1 year old)

増加とともに大きくなっている。また、各器官の損傷程度は、圧力が小さい時は心臓、うきぶくろ、腎臓、肝臓の順に大きくなり、圧力値が大きくなると心臓、肝臓、うきぶくろ、腎臓の順に大きくなっている。

ロ) 腹側部から受圧したもの

全体的な傾向は腹部から受圧した場合と類似しているが、腎臓の損傷程度は腹部から受圧した場合よりやや小さく、また損傷程度のばらつきも大きい。

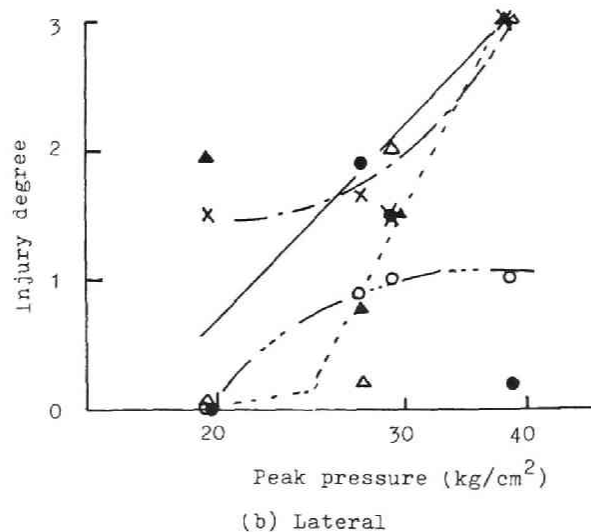
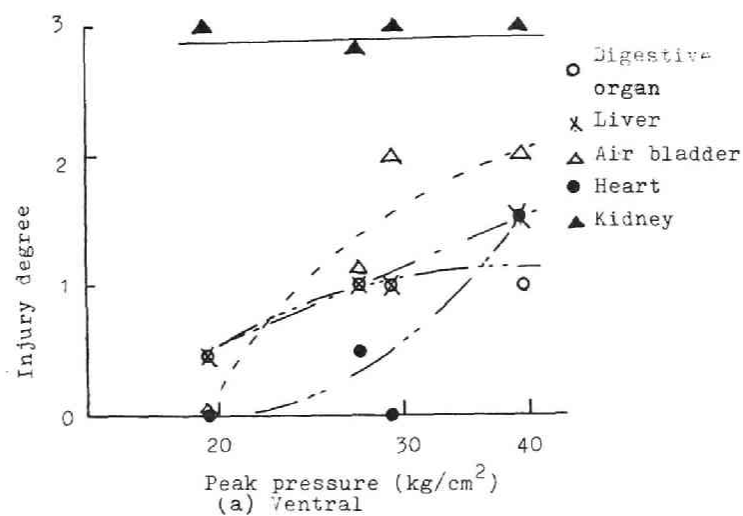
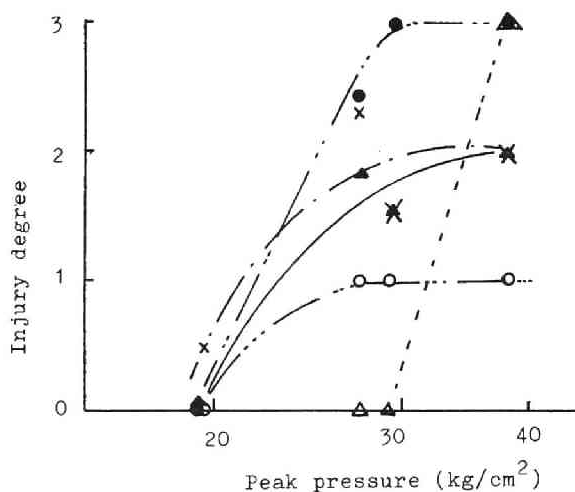


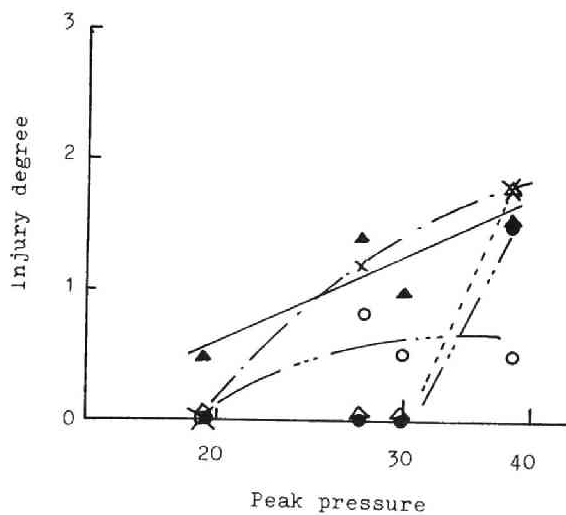
Fig.2.6(3) Relation between injury degree and peak pressure.
(Carp, 2 years old)

ハ) 頭部から受圧したもの

圧力値がそれぞれ17, 21, 26 kg/cm^2 と増加するに伴ない肝臓の損傷の程度は大きくなるが, 30 kg/cm^2 以上の圧力ではその損傷の程度もほぼ一定となってくる。心臓の損傷は圧力値が60 kg/cm^2 以下ではほとんど見られないが, この圧力を越えると, 急激に大きくなっている。うきぶくろと腎臓の損傷は, 腹部や腹側部から受圧した場合と同様であって, 圧力が大きくなるとともに損傷の程度も次第に増大している。



(c) Head

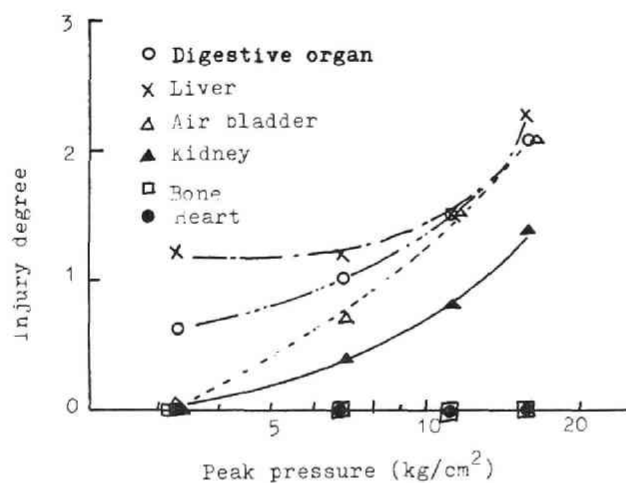


(d) Caudal

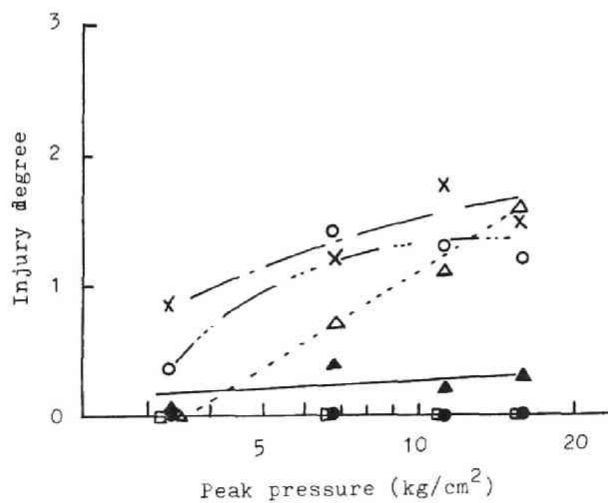
Fig.2.6(4) Relation between injury degree and peak pressure.
(Carp, 2 years old)

二) 尾部から受圧したもの

肝臓の損傷程度は圧力が $2.0 \sim 6.5 \text{ kg/cm}^2$ の間ではほぼ一定である。心臓の損傷は圧力値が 6.0 kg/cm^2 以下では全く認められない。うきぶくろ、腎臓の損傷程度は、いずれも圧力が増加するにつれて大きくなるが、腹部、腹側部、頭部から受圧した場合にくらべて損傷の程度は全体的に小さい。



(a) ventral



(b) Lateral

Fig.2.6(5) Relation between injury degree and peak pressure.
(Sea bream, 8 months old)

2) 2年生コイ

イ) 腹部から受圧したもの

腎臓の損傷が大きく、圧力値 20 kg/cm^2 以上ではほとんど同程度のはげしい損傷を受けている。心臓の損傷については多少のばらつきはあるが、圧力値が $30 \sim 35 \text{ kg/cm}^2$ を境として、これより大きい圧力を受けると大きな損傷を受け、これ以下の圧力ではほとんど損傷は見られない。うきぶくろと肝臓の損傷は圧力値の上昇とともに大きくなっている。消化器の損傷は圧力値が

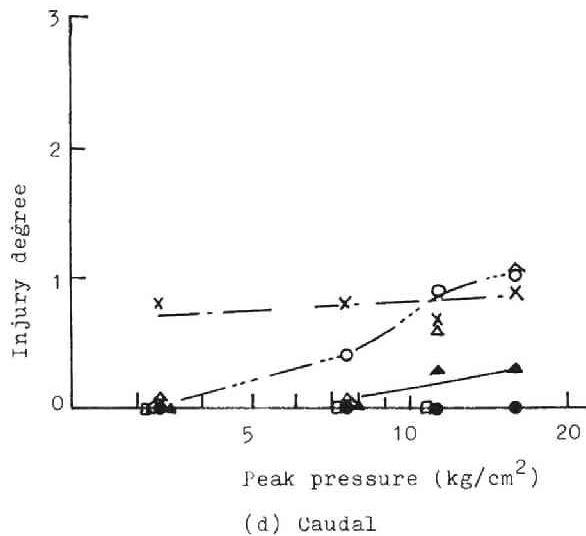
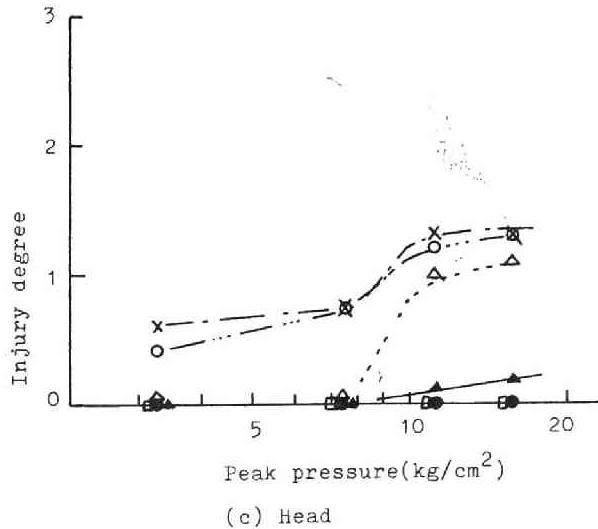


Fig.2.6(6) Relation between injury degree and peak pressure.
(Sea bream, 8 months old)

27 kg/cm² 以上ではほぼ一定である。

ロ) 腹側部から受圧したもの

消化器の損傷は圧力値が 30 kg/cm² 以上ではほぼ一定である。肝臓の損傷は、圧力値が 30 kg/cm² 以下ではほぼ一定で、40 kg/cm² 近くになると損傷は非常に大きくなっており、全体して他の方向から受圧した場合より損傷が大きい。心臓の損傷は非常にばらつきが大きい。うきぶくろの損傷は圧力値が 27 kg/cm² 以下ではほとんど見られないが、これ以上の圧力を受けると非常に損傷が大きくなる。

腎臓の損傷は腹部から受圧した場合より小さいが、全体的にはかなりの程度損傷を受けている。

ハ) 頭部から受圧したもの

消化器の損傷は圧力値が 27 kg/cm² 以上ではほぼ一定である。肝臓の損傷は腹部から受圧した場合に次いで大きい。心臓の損傷は他の方向から受圧した場合よりも大きい。うきぶくろは圧力値が 30 kg/cm² 以下の時はほとんど損傷を受けていないが、37 kg/cm² の圧力では損傷が非常に大きくなっている。

ニ) 尾部から受圧したもの

全体的に見て、頭部、腹側部、腹部から受圧した場合より損傷は少ない。

2 年生コイでは、供試魚数が全体的に少なかったため、観察結果にばらつきが大きい。各内部器官ごとに受圧方向による損傷の大きさを順にならべてみると、消化器では腹部>腹側部⇒頭部>尾部の順に、肝臓では腹側部>頭部>腹部⇒尾部の順に、心臓では頭部>腹側部⇒腹部>尾部の順に、うきぶくろでは腹側部⇒腹部>頭部>尾部の順に、腎臓では腹部>頭部⇒腹側部>尾部の順になっている。

3) マダイ当才魚

イ) 腹部から受圧したもの

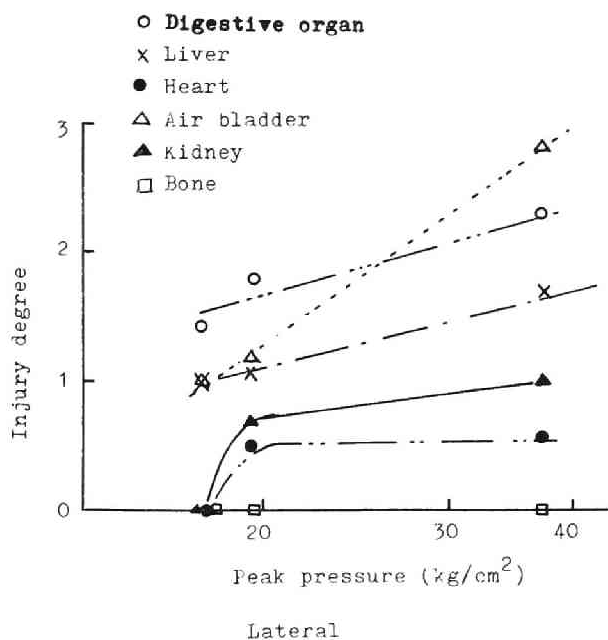


Fig.2.6(7) Relation between injury degree and peak pressure.
(Sea bream, 2 years old)

消化器，肝臓，うきぶくろおよび腎臓の損傷は圧力値が増加するとともに大きくなっている。
心臓および骨格の損傷は認められなかった。

ロ) 腹側部から受圧したもの

消化器の損傷は圧力値が7～15 Kg/cm^2 の間ではほぼ一定である。肝臓の損傷程度は今回の

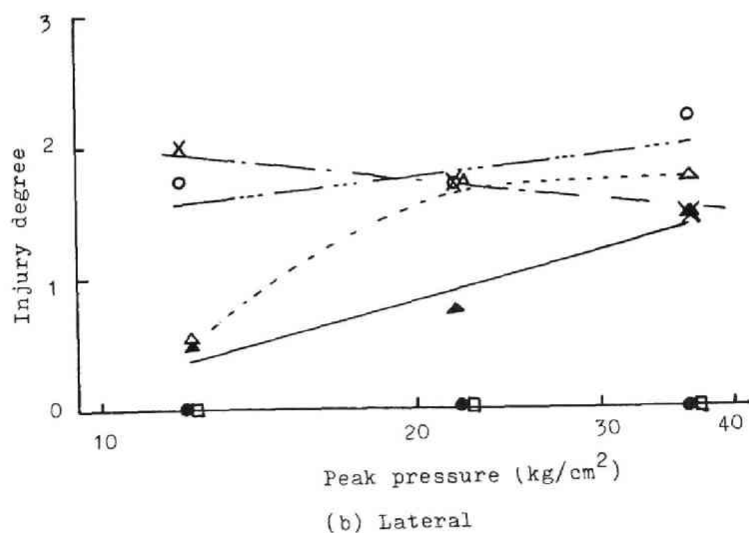
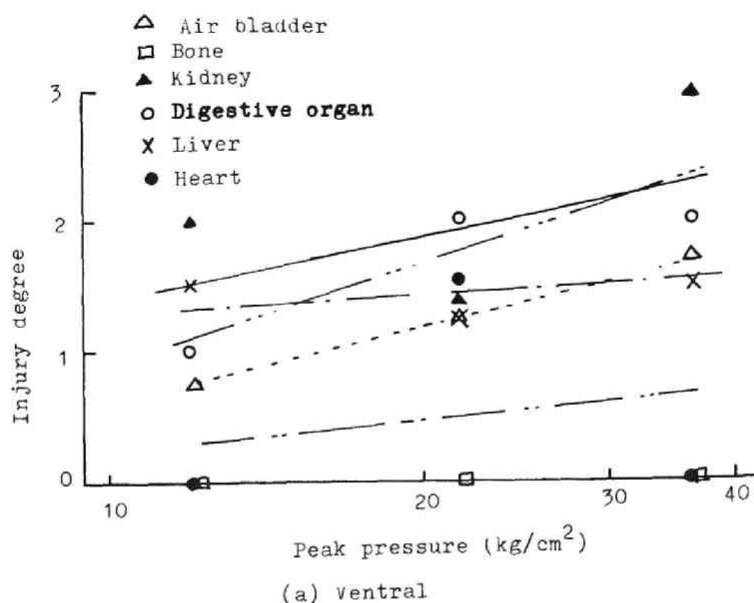
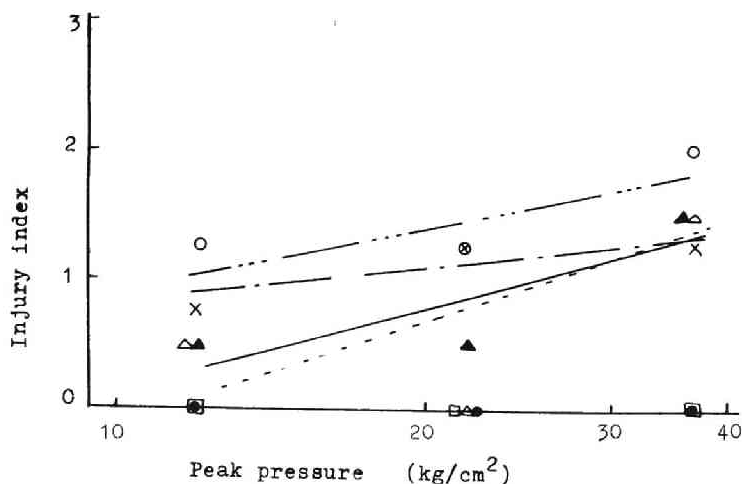


Fig.2.6(8) Relation between injury degree and peak pressure.
(Scorpionfish)

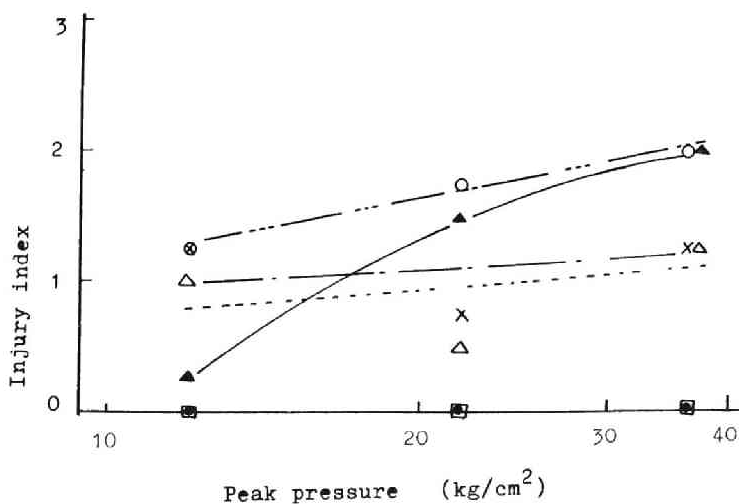
実験における圧力範囲ではあまり差は見られない。心臓と骨格の損傷は見られない。うきぶくろの損傷程度は圧力値が大きくなるとともに増加している。腎臓の損傷程度は非常に小さい。

ハ) 頭部から受圧したもの

消化器と肝臓の損傷程度はほぼ同様の傾向を示し、圧力値の増加とともにわずかながら損傷程度も増加する傾向を示している。うきぶくろについては圧力値が 8 kg/cm^2 以下の時はほとんど損傷は見られないが、これより大きい圧力では急激に損傷程度が大きくなり、 11 kg/cm^2 以上の



(c) Head



(Caudal)

Fig.2.6(9) Relation between injury degree and peak pressure.
(Scorpionfish)

圧力での損傷程度は消化器や肝臓の損傷程度に近いものとなっている。腎臓の損傷程度は非常に小さく、心臓と骨格の損傷はほとんど見られない。

二) 尾部から受圧したもの

消化器の損傷程度は圧力値の増加とともに大きくなり、肝臓の損傷程度は圧力値に無関係にほぼ一定である。うきぶくろは圧力値が 8 kg/cm^2 以下の時はほとんど損傷は見られないが、これより大きい圧力を受けると損傷が見られる。腎臓の損傷は非常に小さく、心臓と骨格の損傷は見られない。

以上の結果をもとにして、各内部器官ごとに損傷程度の大きさを順にならべると次のとおりである。消化器、肝臓およびうきぶくろの損傷程度は腹部>腹側部>頭部>尾部の順になっており、腎臓の損傷程度は腹部>腹側部>尾部>頭部の順である。また、心臓および骨格の損傷は全く見られなかった。

4) マダイ 2 才魚

17.3 kg/cm^2 の圧力値を加えた時の各内部器官の損傷程度の大きさを順は次のとおりである。消化器の損傷程度は腹側部>頭部≒尾部>腹部、肝臓の損傷程度は腹側部≒腹部>頭部>尾部、うきぶくろの損傷程度は腹側部>腹部>頭部>尾部、腎臓の損傷程度は腹部>頭部>尾部>腹側部の順である。心臓と骨格の損傷は 17.3 kg/cm^2 の圧力値を受けた今回の実験の場合にはいずれの受圧方向においても見られなかった。

5) カサゴ

データ数が少ないので、全体的な特徴について述べる。心臓の損傷は腹部から受圧した場合に少し見られるが、他の方向から受圧した場合には認められない。骨格の損傷はいずれの方向から受圧した場合でも全く認められなかった。各内部器官ごとに損傷程度の大きさを順にならべると次のとおりである。すなわち、消化器では腹側部>腹部≒尾部>頭部の順に、肝臓では腹側部>腹部>頭部≒尾部の順に、うきぶくろでは腹部≒腹側部>尾部>頭部の順に、腎臓では腹部>尾部>腹側部≒頭部の順になっている。

以上の結果をとりまとめてさらに整理して示すと次のようになる。重態魚の出現に対する限界圧付近の圧力を魚に加えた場合の各内部器官の損傷程度は、魚種ならびに受圧方向によって差が認められる。しかし、全体的に共通していえることは、心臓および骨格の損傷は小さく、また腎臓の損傷は腹部から受圧した場合に最も大きく、肝臓の損傷は腹側部から受圧した場合に大きくなる傾向が見られることである。コイの場合、心臓の損傷が他の魚種より大きく、とくに頭部から受圧した場合の心臓の損傷が著しい。コイについては、頭部から受圧した場合に重態魚の出現率が大きくなっているが、その理由として心臓の損傷の著しいことがその一因をなしているものと考えられる。

2.3.3 受圧方向と魚の損傷指数との関係

魚類の受ける損傷が水中圧力波の受圧方向によってどのように異なるかについてさらに別の角度から検討してみる。そのために、魚の損傷の程度を損傷指数¹⁾によって定量的に表わし、この損傷指数と水中圧力波の受圧方向との関係について検討することにする。Fig.2.7 は、コイ（1年生および2年生）、マダイ当才魚およびカサゴのそれぞれについて、各実験条件ごとに得られた損傷指数を平均した値と圧力最高値との関係を受圧方向別に整理して示したものである。なお、ここでの損傷指数は主要器官である肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓について得られた損傷程度を示す数値の和として求めたものである。

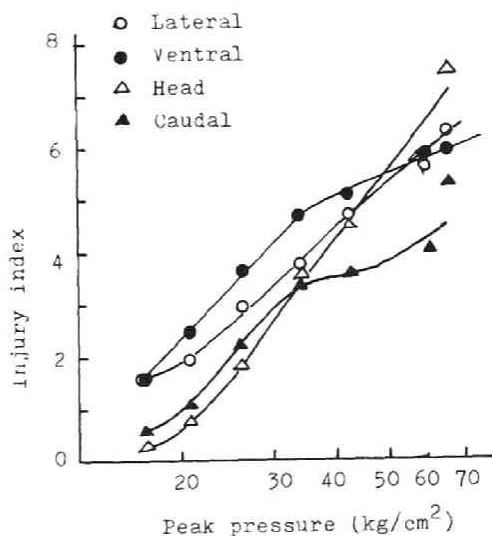


Fig.2.7(1) Relation between injury index and peak pressure.
(Carp, 1 year old)

Fig.2.7 より、受圧方向別の損傷指数と圧力最高値との関係は魚種によって異なることがわかる。各魚種について、受圧方向別の損傷指数と圧力最高値との間に認められる特徴を整理して示すと、次のとおりである。

コイの場合は、圧力最高値が小さければ腹部や腹側部から受圧したとき比較的損傷指数が大きく、頭部や尾部から受圧した時の損傷指数は小さい。ところが、圧力最高値が大きくなると、頭部の損傷がもっとも大きくなるようになる。マダイ当才魚の損

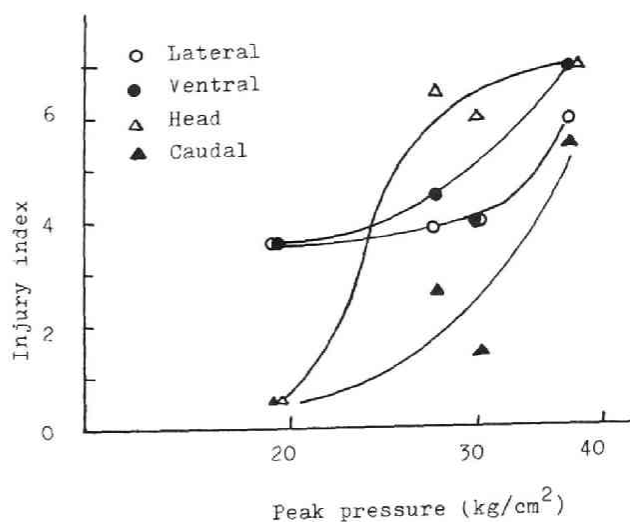


Fig.2.7(2) Relation between injury index and peak pressure.
(Carp, 2 years old)

傷指数は腹部から受圧した時がもっとも大きく、ついで腹側部、頭部、尾部の順に、それぞれの方向から受圧した場合の損傷指数が小さくなっている。また、カサゴの損傷指数も腹部から受圧したときがもっとも大きく、ついで腹側部、尾部、頭部の順に、それぞれの方向から受圧した場合の損傷指数が小さくなっている。このように、いずれの魚種にも共通していえることは、一般的には腹部から受圧した場合の損傷が大きいことである。

しかし、コイの場合は、頭部から受圧すれば、静脈洞破裂を起こすことが多いので、圧力最高値が大きくなると頭部から受圧した時の損傷指数が大きくなる。

第2・4節 結 言

水中圧力波の受圧方向が魚の内部器官の損傷に及ぼす影響は魚種によってかなり差異がある。しかし、各魚種に共通して認められる特徴としては、以下の事柄をあげることができる。

- 1) コイを除く各魚種では、一般に腹部から受圧した場合には、腎臓の損傷が大きく、したがってこの場合の損傷指数が他の方向から受圧した場合のそれらにくらべてもっとも大きい。
- 2) 肝臓の損傷は、腹側部から受圧した場合が、他の方向から受圧した場合にくらべて大きい。

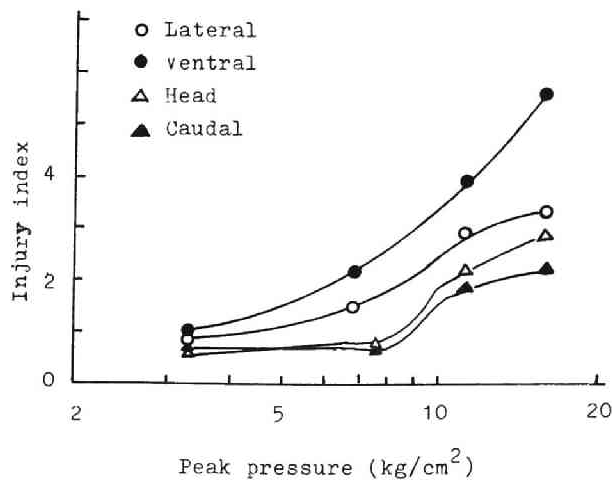


Fig.2.7(3) Relation between injury index and peak pressure.
(Sea bream, 8 months old)

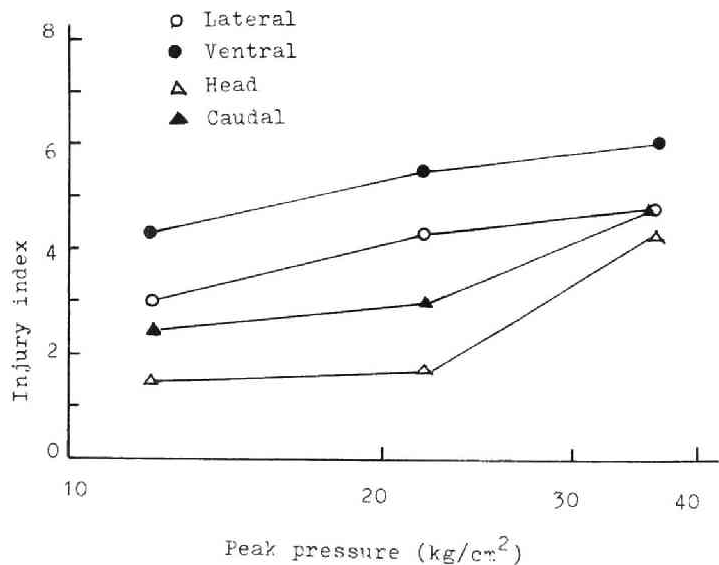


Fig.2.7(4) Relation between injury index and peak pressure.
(Scorpionfish)

3) いずれの方向から水中圧力波を受けても，心臓や骨格は他の器官にくらべて損傷を受けにくい。

4) 魚種にかかわらず，一般に尾部から受圧した時の損傷は小さく，また，コイを除けば，頭部から受圧した時にも損傷が少ない。

5) コイの場合は，頭部から受圧した時は心臓の損傷，とくに静脈洞破裂が多いので，圧力最高値の大きい水中圧力波を受圧した時の損傷指数や重態魚の出現率が大きい。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団，安全工学協会：水中発破による衝撃圧等報告書，P.160，(1972)

第3章 魚類の損傷と水中圧力波の圧力波形との関係

第3.1節 緒 言

第2篇の前章までに述べた研究では、魚類の損傷に対する水中圧力波の影響をたんに水中圧力波の圧力最高値との関係のみで考察してきた。ところが、水中圧力波の圧力波形が異なる場合、圧力最高値が同じであっても、圧力波のインパルスやエネルギー密度は異なってくる。そこで、魚類の損傷が果して圧力波の圧力最高値のみ依存しているかどうかについてさらに検討し、圧力波の圧力波形が魚類の損傷に及ぼす影響について明らかにしておく必要がある。

本章では、魚の損傷に与える水中圧力波の波形の影響について、次の2点から検討した。

- 1) 圧力パルスがくり返して魚類に加えられた場合、そのくり返しが魚類の損傷に及ぼす影響
 - 2) 圧力パルスのパルス幅が魚類の損傷に及ぼす影響
- 2)の問題については、水中圧力波の圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度のそれぞれと魚の損傷指数との関係を求め、魚の内部器官の損傷がこれらの3つの因子のそれぞれにどの程度依存しているかについて検討した。

第3.2節 実験方法

実験は東京大学工学部安全工学実験所の実験水槽で行なった。供試魚には1年生コイを用い、これらを第2篇第1章や第2章で述べた実験と同様に、麻酔薬MS-222で麻酔してガーゼで作った袋に入れ、軽く包んで真珠養殖用の段ごに収容し、水槽の所定の位置に設置した。この場合、受圧方向別の検討ができるように、魚の腹部、腹側部、頭部および尾部のそれぞれの方向が爆源の方向に向くようにそれぞれのかごを設置し、得られた測定資料は受圧方向別に整理した。

くり返しパルスの実験には、爆源として瞬発ならびに遅発電気雷管を使用し、希望するくり返しパルスのパルス間隔とくり返し数に応じて、これらの雷管を組み合わせで用いた。たとえば、25 ms 間隔で3個のパルスを得たい時は、瞬発、MS 2段およびMS 3段の6号電気雷管を3本ずつ束ね、これをFig. 3.1に示すように塩ビパイプの中に入れて固定した。塩ビパイプは外径26 mm、内径20

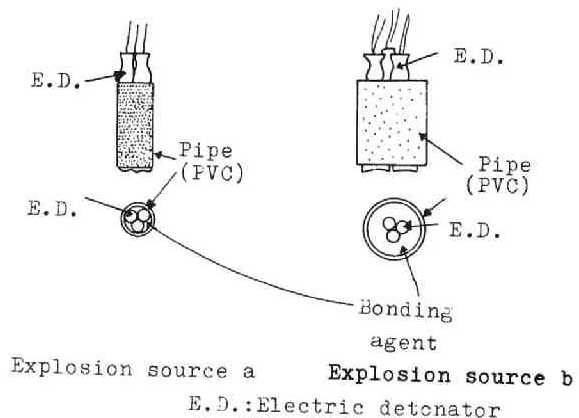


Fig.3.1 Explosion source for the examination about effect of repeat of pressure pulse to damage of fish.

mmのものと外径22mm、内径16mmのものの2種類を用い、雷管と塩ビパイプの間は接着剤を充填した。このようにして加工した電気雷管は、殉爆を防止するために、30cmの間隔をおいて水槽内の所定の位置に設置した。なお、正確なパルス間隔は圧力測定結果から求めた。また、この実験では魚の腹側部を爆源の方向に向けるようにした。

一方、パルス間隔の影響についての実験には、Fig. 3.2に示す5種類の爆源を使用した。

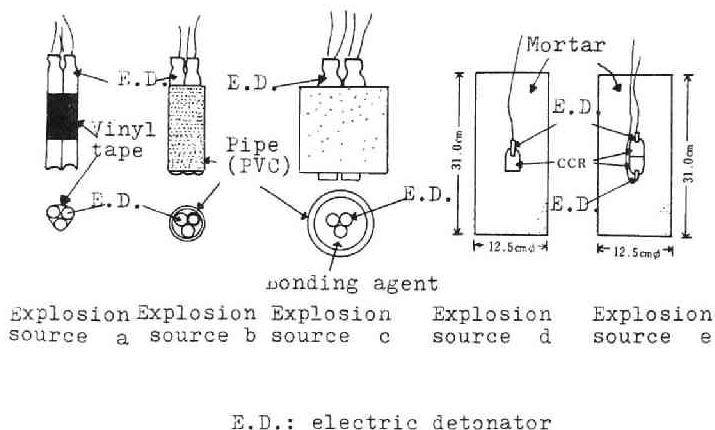


Fig.3.2 Explosion source for the examination about effect of pressure pulse width to damage of fish.

爆源a, b, cはいずれも6号電気雷管を加工したもので、爆源aは電気雷管1~4本を束にして、その周囲をビニールテープで巻いたものであり、爆源bおよびcはくり返しパルスの実験に用いた爆源と同一種で、3本束ねた電気雷管を塩ビパイプに挿入したものであるが、これらのうち爆源cは、電気雷管と塩ビパイプの間の空間部に接着剤を充填したものであり、爆源bは空間部には何も充填しないものである。爆源dおよびeはコンクリート破砕器（CCR旭2号、薬量30g、以下CCRと略称する）を加工したものである。すなわち、爆源dは起爆薬として6号電気雷管を取りつけたCCRを直径125mm、高さ310mmの円筒型モルタルブロックの中央に装填したものであり、また、爆源eは爆源dに用いたものと同じモルタルブロックに電気雷管付CCRを2個装填したものである。爆源と供試魚および圧力計は水面下2.5m（水槽の水深は3.3m）の位置に設置した。なお、供試魚と圧力計は同一点におき、供試魚と爆源の距離は供試魚の位置で希望する圧力値が得られるように選んだ。

圧力の測定は第2篇第1章あるいは第2章に述べた実験と同じ方法で行なった。ただし、本章の実験ではインパルスおよびエネルギー密度を求める必要がある。そこで、トランジェントレコーダにミニコンピュータを接続し、測定波形をON-LINEでミニコンピュータにとり込み、インパルスやエネルギー密度を計算させた。使用したミニコンピュータは日本ミニコン製NOVA-MODEL 01で、主記憶容量16KWのものである。

受圧した魚の観察および解剖結果の処理は前章に述べた実験と同一方法で行なった。

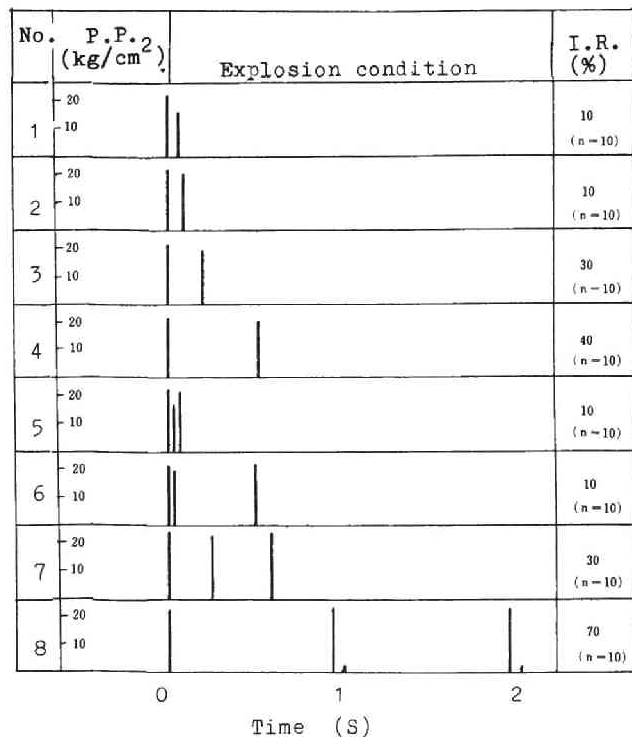
第3.3節 実験結果および考察

3.3.1 くり返しパルスの影響について

くり返しパルス実験において、Fig. 3.1に示す爆源aを用いた実験により得られた結果をFig. 3.3およびTable 3.1に示し、爆源bを用いた実験により得られた結果をFig. 3.4およびTable 3.2に示す。Table 3.1およびTable 3.2に示した重態魚の出現率は、受圧直後の魚の状態がへい死のものおよび極度のけいれん状態のものの出現率を表わしている。

圧力パルスのくり返しが魚類の損傷に及ぼす影響を明確にするためには、上記の結果とパルスが1回加わった時の

結果とを比較検討する必要がある。そこで、Fig. 3.1に示した爆源aを1個使って、コイの腹側部より圧力パルスを1回だけ加えた実験を行ない、得られた損傷指数と圧力最高値との関係を最小自乗法により求めて次の(3.1)式を得た。ただし、この場合には、水槽壁面からの反射波やバブルパルスが生ずるので、厳密に言えば何回かの圧力パルスがコイに作用していることになるが、これらの後続のパルスのピーク圧は初動のパルス



P.P.:Underwater peak pressure

I.R.:Percentage of seriously damaged fish

n :Number of fish

Fig.3.3 Frequency of the percentage of seriously damaged fish by the difference of explosion conditions(1).

Explosion source a

Table 3.1 Relation between extent of injury and time interval of pressure pulses(1)

(Explosion source a)

No.	Peak pressure (kg/cm ²)			Time interval (mS)		I.R.(%)	I.I.
	P _{m1}	P _{m2}	P _{m3}	T ₁₂	T ₂₃		
1	22.1	17.2	-	35.7	-	10	3.50(3.93)
2	23.2	20.6	-	77.6	-	10	3.70(4.16)
3	23.1	20.0	-	197.2	-	30	4.30(4.14)
4	22.9	21.4	-	491.4	-	40	5.20(4.10)
5	26.1	18.7	22.2	14.8	18.8	10	4.10(4.70)
6	21.5	20.6	22.4	15.0	473.0	10	4.20(3.99)
7	26.2	22.5	23.6	227.1	324.3	30	5.20(4.73)
8	24.1	25.1	23.4	898.7	961.2	70	6.10(4.53)

P_{m1}:Peak of the first pressure pulse

P_{m2}:Peak of the second pressure pulse

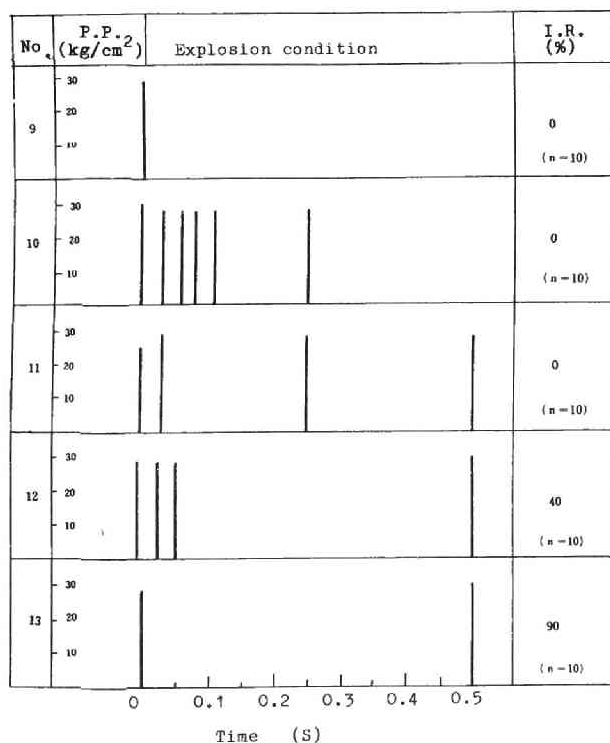
P_{m3}:Peak of the third pressure pulse

T₁₂:Interval between the first and the second pulses

T₂₃:Interval between the second and the third pulses

I.R.:Percentage of seriously damaged fish

I.I.:Injury index



P.P.:Underwater peak pressure

I.R.:Percentage of seriously damaged fish

n:Number of fish

Fig.3.4 Frequency of the percentage of seriously damaged fish by the difference of explosion conditions(2)
Explosion source b

Table 3.2 Relation between extent of injury and time interval
of pressure pulses(2)

(Explosion source b)

No.	Peak pressure (kg/cm ²)						Time interval (mS)					I.R.(%)	I.I.
	P _{m1}	P _{m2}	P _{m3}	P _{m4}	P _{m5}	P _{m6}	T ₁₂	T ₂₃	T ₃₄	T ₄₅	T ₅₆		
9	29.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	4.0
10	30.7	(30)	(30)	(30)	(30)	(30)	(25)	(25)	(25)	(25)	(25)	0	4.3
11	24.1	16.9	20.5	21.0	-	-	20	190	300	-	-	0	4.3
12	28.0	28.6	-	-	-	-	490	-	-	-	-	40	6.0
13	30.0	23.6	30.1	-	-	-	40	497	-	-	-	90	7.6

():Planning peak pressure or time interval.

P_{mi}:Peak of the i-th pressure pulse.

T_{i,i+1}:Interval between the i-th and the (i+1)-th pulses.

I.R.:Percentage of seriously damaged fish.

I.I.: Injury index.

のピーク値の1/10 以下の大きさであるため、これらの後続のパルスによる影響は無視することとした。

$$I.I. = 10.86 \log P_m - 10.67 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで、 I.I. : 損傷指数

P_m : 圧力最高値 (Kg/cm²)

そこで、Table 3.1に示したくり返しパルスの実験により得られた圧力最高値を(3.1)式の P_m に代入すれば、この圧力最高値をもつ圧力パルスが1回だけ加わった時の損傷指数を求めることができる。このようにして求めた損傷指数をTable 3.1の損傷指数の欄の()内に示した。くり返しパルスにより得られた損傷指数と()内に示したそれらとを比較すると、番号1, 2および5の実験により得られた損傷指数は、むしろ()内に示した損傷指数の方が大きいので、これらの実験で生じた魚の損傷には圧力パルスのくり返しによる影響は加味されていないと判断できる。一方、番号4および8の実験で得られた損傷指数は()内に示した値より大きく、これらの値は圧力パルスを1回のみ加えた場合の損傷指数の誤差範囲外にある。すなわち、圧力パルスを1回のみ加えた時の実測値をもとに、90%信頼性の損傷指数の範囲を求めると、実験4と同じ圧力最高値 22.9 Kg/cm²の場合には3.02~5.18、また、実験8と同じ圧力最高値 25.1 Kg/cm²の場合には3.45~5.61となるからである。また、重態魚の出現率も実験4と8の場合には大きい。これらのことから、実験4と8の場合には、圧力パルスのくり返しにより魚の損傷が増加したと判定される。そのほか、実験3, 6および7で得られた損傷指数はいずれも()内の値より大きくなっているが、これらの値は圧力パルスが1回のみ加わった時の損傷指数の誤

差範囲内に入っているため、これらの実験で生じた魚の損傷に対して圧力波のくり返しの影響があったかどうかについて明確に判定することはできない。

一方、Fig. 3. 2 の爆源 b を使った実験では、圧力パルスは 1 回のみ加えた時のデータが番号 9 の実験のみであるから、この実験で得られた損傷指数とくり返しパルスを加えた時のそれらの値とを、Table 3. 2 および Fig. 3. 4 により比較してみる。実験 12 および 13 で得られた重態魚の出現率および損傷指数の値は、いずれも実験 9 で得られたそれらの値にくらべて明らかに大きい。したがって、これらの実験において生じた魚の損傷には、圧力パルスのくり返しによる影響が加味されているものと判定できる。これに対し、実験 10 および 12 で得られた損傷指数および重態魚の出現率はいずれも実験 9 で得られたそれらの値とほとんど差がないので、これらの実験で生じた魚の損傷に対して圧力パルスのくり返しの影響が加味されたとはいえない。

さて、以上に述べたように、圧力パルスのくり返しにより魚の損傷がより大きくなったと認められたのは実験 4, 8, 12 および 13 の場合であるが、これらの実験ではいずれもその中にパルス間隔が 450 ms 以上あるパルスが含まれている。また、魚の損傷に対して圧力パルスのくり返しの影響が全く認められなかった実験 1, 2 および 5 の場合には、発生したパルスのパルス間隔がいずれも 100 ms 以内である。さらに、実験 3, 10 および 11 の場合のように、発生したパルスのパルス間隔に 200 ms 程度のものが含まれていても、魚の損傷に対し圧力パルスのくり返しの影響がほとんど見られない場合もある。このように考えると、少なくともその間隔が 500 ms 前後以上のかかなり長い間隔で発生したパルスが魚類に与えられた場合には、このパルスのくり返しにより魚類の損傷はより大きくなる可能性があることがわかる。

3. 3. 2 パルス幅の影響について

この実験に用いた爆源 b および e の爆発によって生ずる水中圧力波の圧力波形の例を Fig. 3. 5 に示す。図に見られるように、電気雷管を加工してつくった爆源 a, b および c の爆発により得られる水中圧力波は、一般にそのパルス幅が $50 \sim 100 \mu\text{s}$ と短かく、CCR を加工してつくった爆源 d および e による圧力波のパルス幅は一般に 1 ms 前後である。このように、電気雷管を加工してつくった爆源と CCR を加工してつくった爆源とではパルス幅に大きな差があり、パルス幅の影響を検討するにはこれはいずれも有効な爆源であるといえる。以下の説明では、便宜上、電気雷管を加工してつくった爆源によって得られた水中圧力波形を雷管型、CCR を加工してつくった爆源によって得られた水中圧力波形を CCR 型と呼ぶことにする。

さて、水中圧力波の大きさを表わす物理量には、圧力最高値 P_m 、インパルス I およびエネルギー密度 E_f の 3 つが考えられ、 I および E_f は次式によって与えられる。

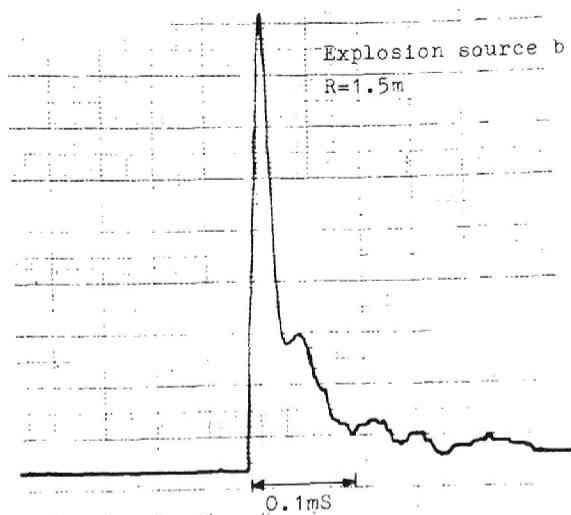


Fig.3.5(1) Example of wave form of underwater pressure wave caused by explosion of electric detonator.
R:Distance from explosion source

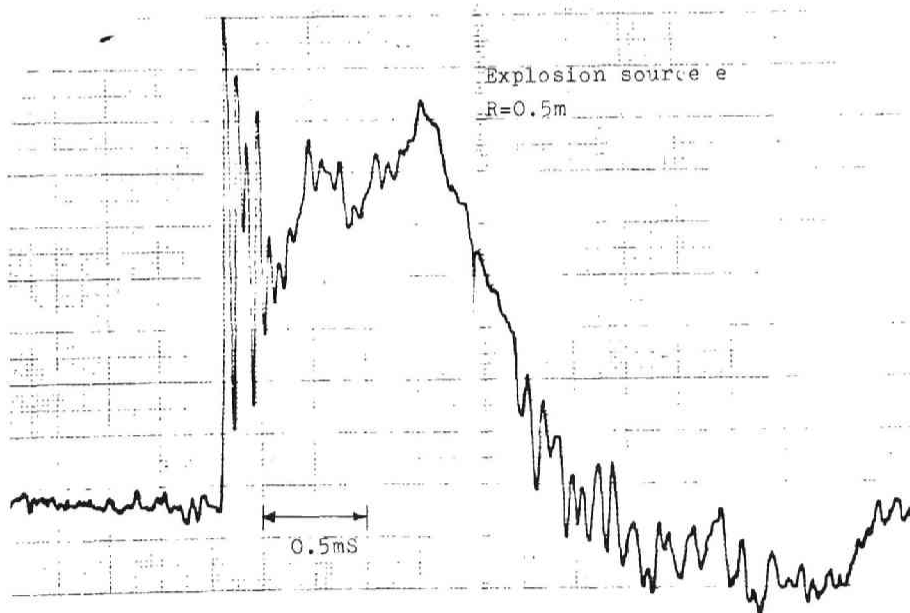


Fig.3.5(2) Example of wave form of underwater pressure wave caused by explosion of CCR.

$$\left. \begin{aligned} I &= \int \{ P(t) - P_0 \} dt \\ E_f &= \frac{1}{\rho_0 C_0} \int \{ P(t) - P_0 \}^2 dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここで、 $P(t)$ ：時間関数としての圧力値

P_0 ：初 圧

ρ_0 ：媒質の密度

C_0 ：媒質中での音速

(3.2)式から明らかなように、このようにして求められるインパルスとエネルギー密度には、いずれも時間因子が積分の形で入っており、パルス幅の影響はこれらの量の中に含まれてくることになる。そこで、実験結果を整理し、これらの物理量と供試魚であるコイの損傷指数および重態魚の出現率との関係を受圧方向ごとに整理し、Fig. 3.6に示した。これらの図より、圧力最高値やインパルスを横軸とした場合は、CCR型と雷管型では全く異った線上にプロットされるようになるが、エネルギー密度を横軸にした場合は、この両者は同一線上にプロットされることがわかる。そのため、コイの損傷は、圧力波の圧力最高値やインパルスよりもむしろエネルギー密度と相関性が高いことがわかる。したがって、水中圧力波の大きさを表わす尺度としてエネルギー密度をとれば、水中圧力波の波形が異なっても、魚の損傷と水中圧力波の強さを同じ基準の上で統一的に論ずることができることになる。

受圧方向別の魚類の損傷の特徴を把握するために、4方向での測定結果をとりまとめ、エネルギー密度と供試魚の損傷指数および重態魚の出現率との関係を整理して示すと、Fig. 3.7のようになる。

腹部や腹側部から受圧した場合は、エネルギー密度が 130 J/m^2 以上で重態魚があらわれており、 350 J/m^2 では重態魚の出現率が約 50% となっている。また、頭部から受圧した場合に重態魚があらわれるのは、エネルギー密度が 180 J/m^2 以上であるが、 230 J/m^2 ではすでに重態魚の出現率が 50% となっている。このように頭部から受圧した場合は、腹部、腹側部、尾部から受圧した場合にくらべて、エネルギー密度と重態魚の出現率との関係を示す直線の勾配が大きくなっているが、これに対しては、前にも述べたように、頭部から受圧すれば、心臓とくに静脈洞の破裂が致命傷になることが多いことが大きな要因となっている。

Fig. 3.7を見ると、水中圧力波のエネルギー密度が約 140 J/m^2 以下であると、重態魚の出現率が 0% となっている。これより、魚の個体差や受圧方向によるバラツキはあるが、コイの場合は、水中圧力波の強さがほぼ 140 J/m^2 を境として、これ以上の強さの圧力波を受けるとへい死魚が現われるようになることがわかる。

さて、コイを使って行なった水槽実験で得られた上記の関係が、現場において行なわれた大規

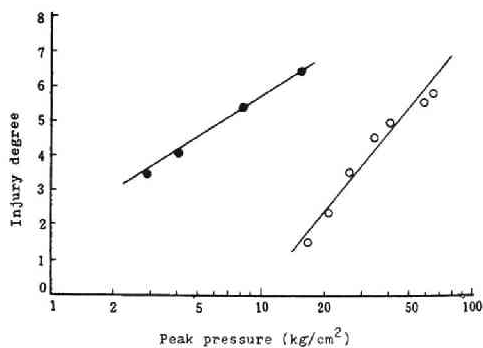
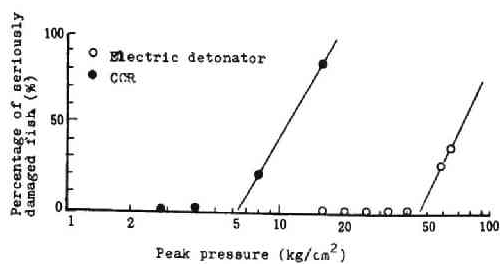


Fig.3.6(1) Relation between the influence to fish and peak pressure.
(Ventral)

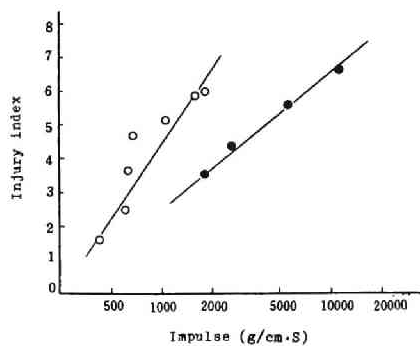
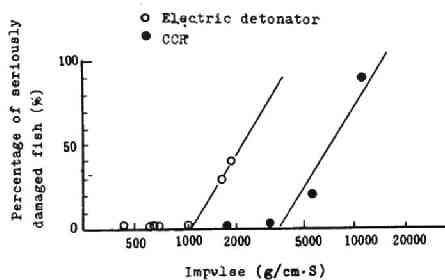


Fig.3.6(2) Relation between the influence to fish and impulse.
(Ventral)

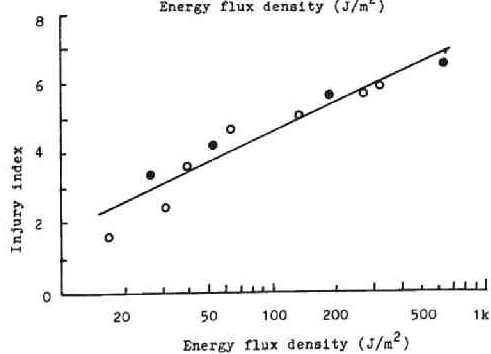
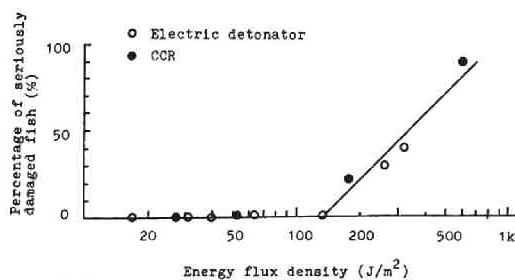


Fig.3.6(3) Relation between the influence to fish and energy flux density.
(Ventral)

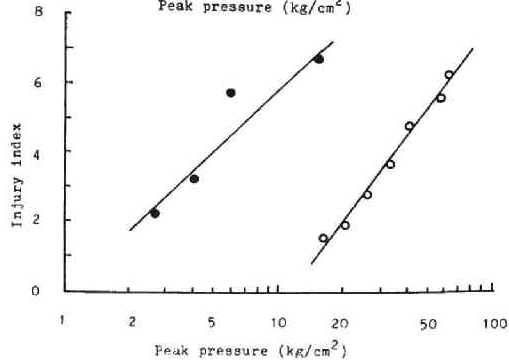
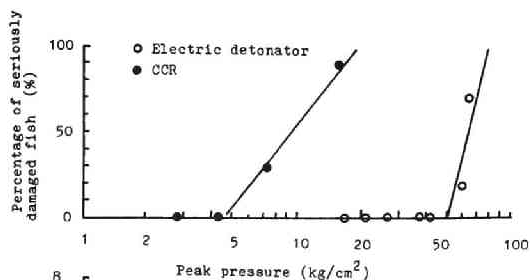


Fig.3.6(4) Relation between the influence to fish and peak pressure.
(Lateral)

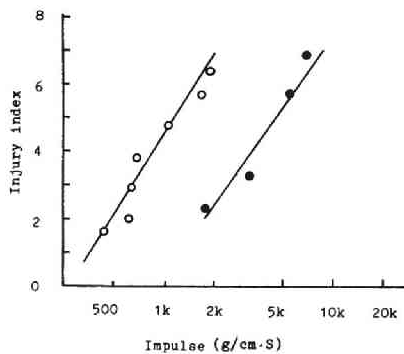
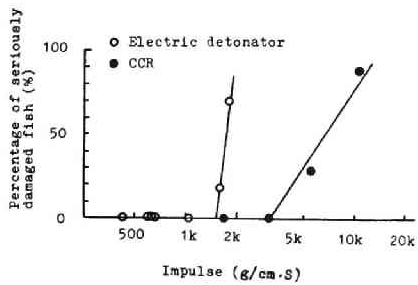


Fig.3.6(5) Relation between the influence to fish and impulse.
(Lateral)

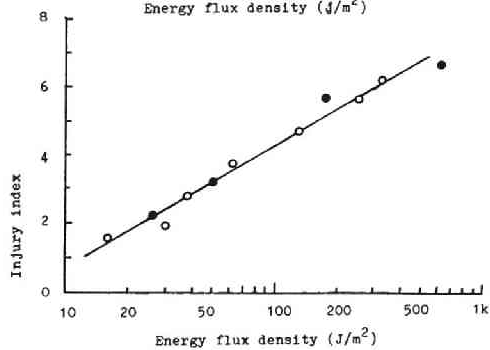
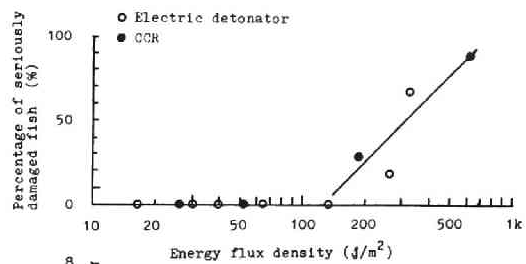


Fig.3.6(6) Relation between the influence to fish and energy flux density.
(Lateral)

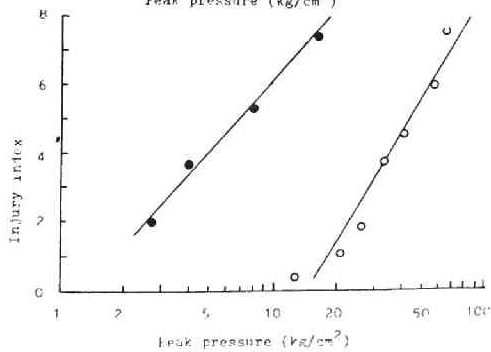
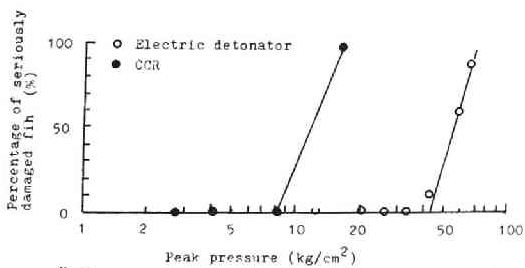


Fig.3.6(7) Relation between the influence to fish and peak pressure.
(Head)

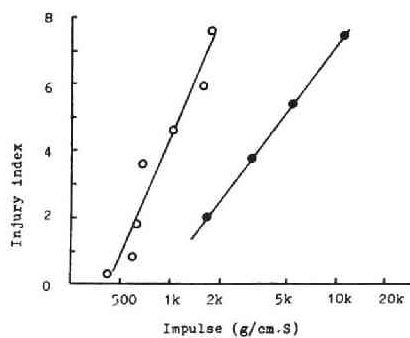
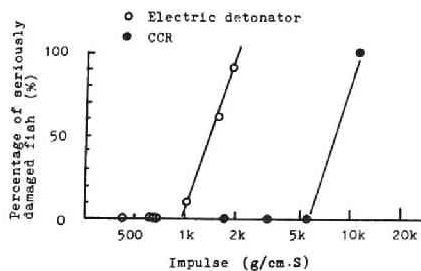


Fig.3.6(8) Relation between the influence to fish and impulse.
(Head)

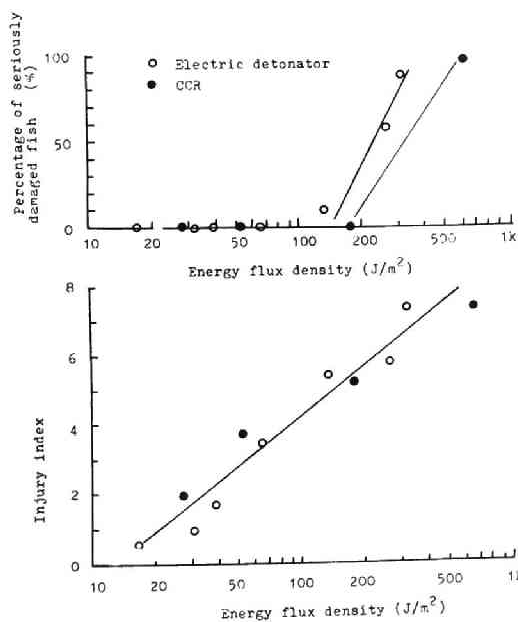


Fig. 3.6(9) Relation between the influence to fish and energy flux density. (Head)

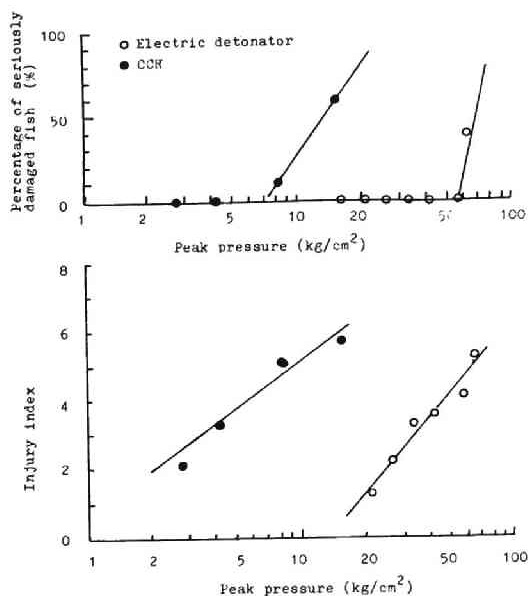


Fig. 3.6(10) Relation between the influence to fish and peak pressure. (Caudal)

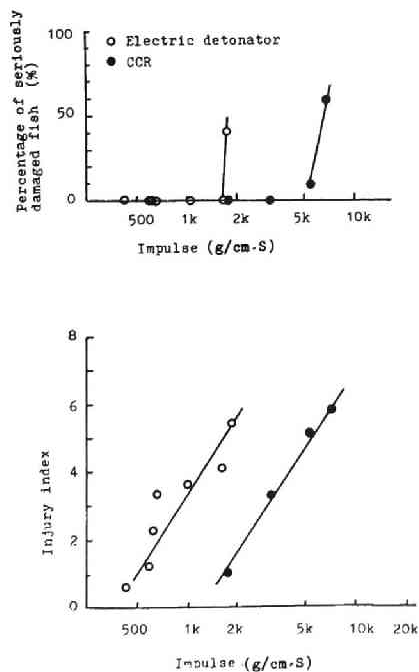


Fig. 3.6(11) Relation between the influence to fish and impulse. (Caudal)

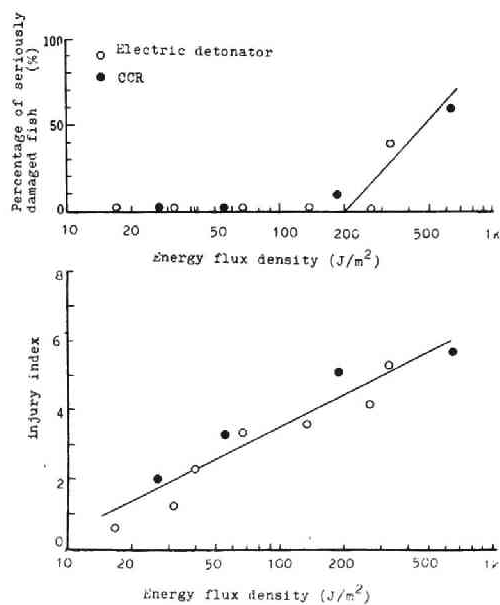


Fig. 3.6(12) Relation between the influence to fish and energy flux density. (Caudal)

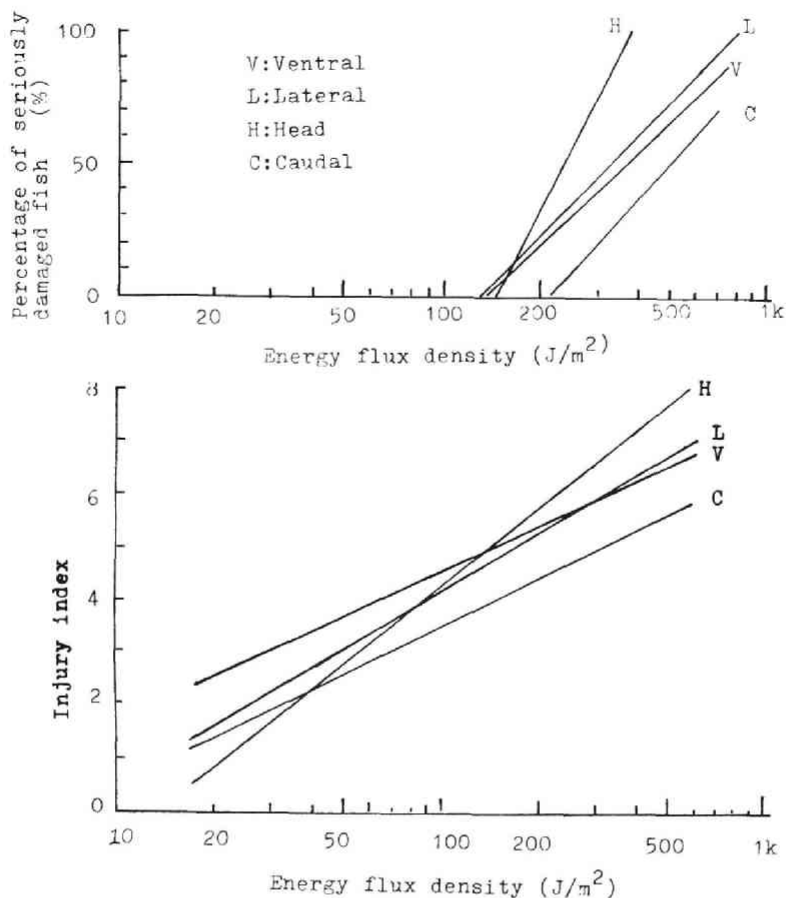
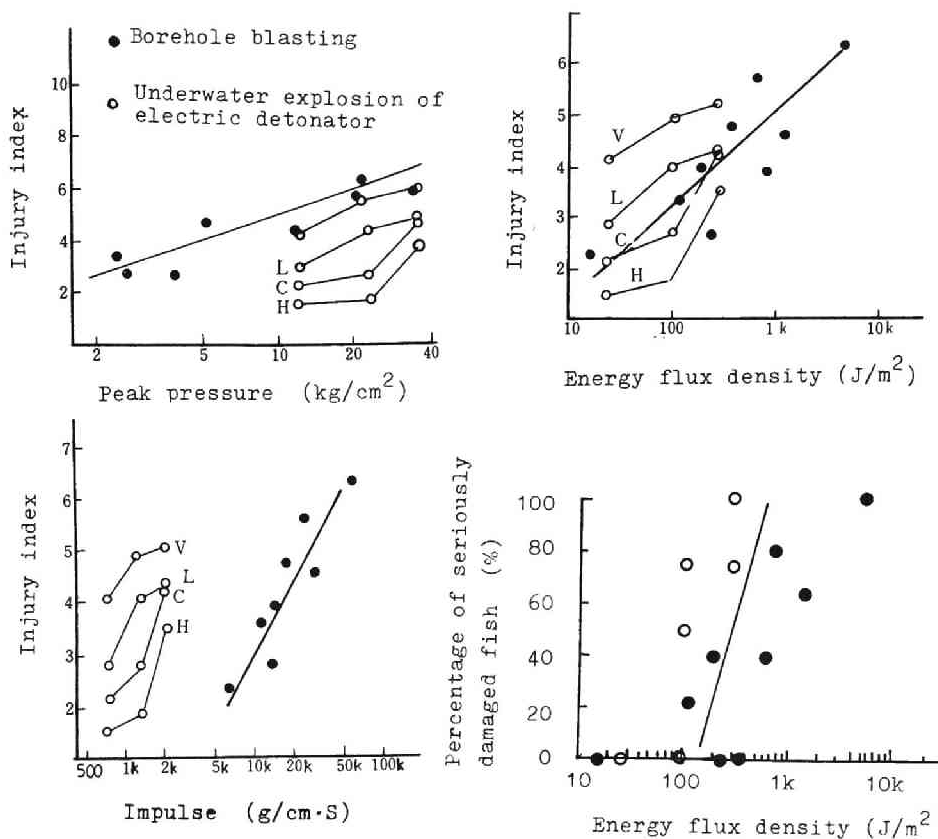


Fig.3.7 Relation between the influence to fish and energy flux density.

模な海底爆破での魚類の損傷に対しても適用できるかどうかについて、本州四国連絡橋公団が坂出沖で行なった実験の資料^{1),2)}あるいは既往の実験資料³⁾を整理して検討した。すなわち、本州四国連絡橋公団では、昭和50年2月～3月に香川県坂出沖で海底爆破実験（薬量180Kg～1,520Kg）を行ない、水中圧力波の測定、魚類の被害調査などを実施した。この実験に用いた魚のうち、カサゴとスズキについては、それぞれ電気雷管およびダイナマイトの水中宙吊り爆発による水中圧力波を受圧した場合の既往の実験データがあるので³⁾、坂出実験と宙吊り爆発実験の結果をあわせて検討した。まず、カサゴについては、第2篇第2章で説明したように、水産庁南西海区水産研究所の水槽を借りて先に電気雷管による宙吊り爆発実験を行なっているので、この結果から得られた損傷指数と圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度との関係をFig. 3.8に示し、また、坂出実験によって得られたカサゴの損傷指数と水中圧力波の圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度との関係をあわせてFig. 3.8に示した。さらに、これらの実



V:Ventral H:Head L:Lateral C:Caudal

Fig.3.8 Relation between the influence to fish and strength of underwater pressure wave caused by underwater explosion of electric detonator at the Nansei Regional Fishers Laboratory and underwater borehole blasting at Sakaide.

(Scorpionfish)

験によって得られた重態魚の出現率と水中圧力波のエネルギー密度との関係をも Fig. 3.8 に示した。一方、スズキについては、三重県の実験所において行なったダイナマイトの宙吊り爆発実験がある³⁾。この実験は、水深約 10 m の海域において水面下 3 m の位置に新桐ダイナマイトを設置し、爆源からの距離が 10 ~ 40 m で水面下 4 m の位置に供試魚のスズキと圧力計を配置し、ダイナマイトの爆発によるスズキの損傷を調べたものである。Fig. 3.9 にはこの実験所における実験および坂出実験によって得られたスズキの損傷指数と水中圧力波の圧力最高値、

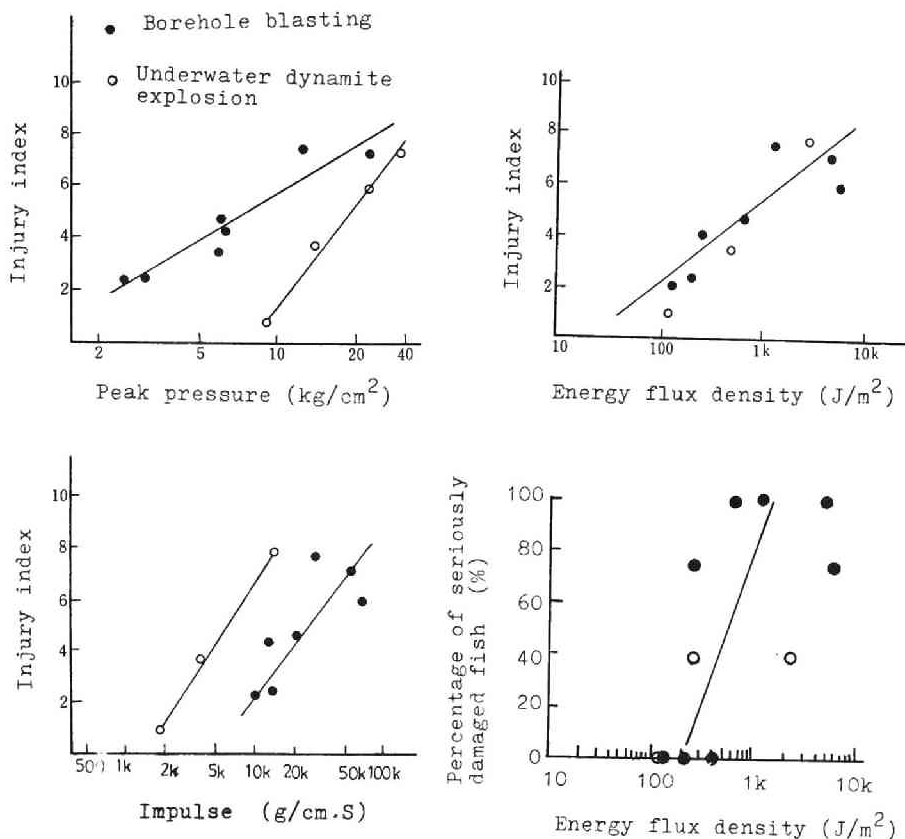


Fig.3.9 Relation between the influence to fish and strength of underwater pressure wave caused by underwater dynamite explosion at Gokasho bay and underwater borehole blasting at Sakaide.
(Japanese perch sea-wolf)

インパルスおよびエネルギー密度との関係を示した。また、これらの実験によって得られた重鰐魚の出現率と水中圧力波のエネルギー密度との関係もあわせてFig. 3.9に示した。坂出実験によって得られた圧力波形には振動的な波形が含まれているが、この場合は、圧力がくり返し作用しているものと見なすことができる。しかし、振動的な波動の主要部の持続時間は100ms以内であるので、魚の損傷に対してはこれらの振動的なパルスのくり返しの効果はないものと考えられる。そこで、エネルギー密度やインパルスを求める時は、波動全体に対して計算するのではなく、パルスごとにインパルスやエネルギー密度を求め、それぞれが最大値となる時のインパルスやエネルギー密度をその振動的な圧力パルスのインパルスやエネルギー密度とした。いいかえれば、波動の圧力-時間曲線 $P=P(t)$ と初圧 P_0 の交点を $t_0, t_1, t_2, \dots, t_1$ (t_0 は擾乱開始点)とし、 $t_i \sim t_{i+1}$ の区間で $P(t) > P_0$ であるようなすべての i に対して、この区間のインパルスやエネルギー密度を求め、それぞれが最大値となる区間のそれらの値をその波

動のインパルスやエネルギー密度とした。たとえば，Fig. 3.10 に示した水中圧力波の波形例では斜線で示したような $P(t) > P_0$ である部分が同一波形中にいくつか見られるが，これら

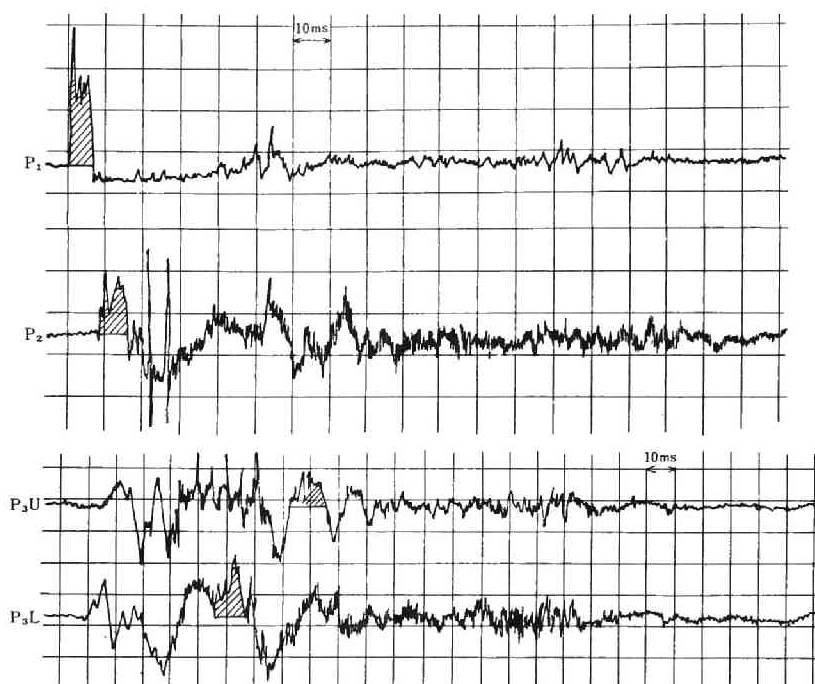
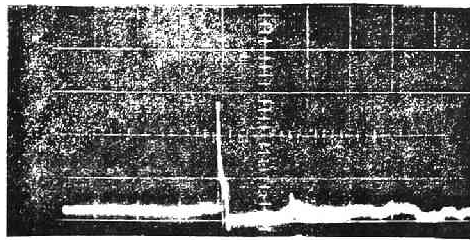


Fig.3.10 Examples of pressure wave-form generated by underwater borehole blasting at Sakaide.

のうち，インパルスやエネルギー密度が最大値となるのは斜線で示した波形部分であるので，これらの斜線部分の波形について求めたインパルスやエネルギー密度をそれぞれの波動のそれらとしたわけである。また，坂出実験の結果に対する内部器官の損傷程度の整理については，著しい影響を受けた場合に認められるような骨格の損傷などは除き，内部器官としては比較的損傷を受け易く，かつ主要器官である肝臓，心臓，うきぶくろ，腎臓の4器官にしぼって検討した。したがって，現場実験の結果の検討より得られた損傷指数の値は前章で示した損傷指数の値とは異なっている。

五ヶ所湾の実験で得られた水中圧力波の波形の一例を Fig. 3.11 に示す。このように，火薬類の宙吊り爆発によって得られる水中圧力波の波形は，電気雷管を用いてもダイナマイトを用いても，圧力が急激に立ち上がってピーク圧に達し，その後指数関数的に減衰するような波形となる。一方，穿孔爆破による圧力波形は，第1篇第4章で明らかにしたように，爆源近傍ではパルスのな波形であるが，爆源から離れた遠方では振動的な波形となり，火薬類の宙吊り爆発により得られる水中圧力波形とは全く異なったものとなる。



Time mark:5mS/Div.

Fig.3.11 Example of wave form of underwater pressure wave caused by underwater dynamite explosion at the Gokasho bay.

さて、Fig. 3.8およびFig. 3.9について、カサゴおよびスズキの損傷指数とエネルギー密度との関係を見ると、火薬類の宙吊り実験および穿孔爆破実験により得られた両者の間にはほぼ1本の直線で表わしうる関係が認められるが、インパルスや圧力最高値と損傷指数の間には必ずしもこのような関係が成立していない。このように、カサゴやスズキを用いた大規模な現場実験の結果からも、コイを使った水槽実験の場合と同様に、魚の損傷指数と水中圧力波のエネルギー密度との間に高い相関性があることがわかった。また、Fig. 3.8およびFig. 3.9の重態魚の出現率と水中圧力波のエネルギー密度の関係を見ると、水中圧力波のエネルギー密度が、カサゴでは約 100 J/m^2 以下、スズキでは約 200 J/m^2 以下では重態魚の出現率は0%である。したがって、水中圧力波を受けることにより重態魚が発生するかどうかのエネルギー密度の許容限界は、カサゴではほぼ 100 J/m^2 、スズキではほぼ 200 J/m^2 であることがわかる。

さて、以上の検討の結果、水中圧力波による魚の損傷を検討する場合には、エネルギー密度をパラメータとして論ずる方が都合がよいことが判明したが、現実の問題として、エネルギー密度を直接現場計測で求めることは圧力最高値を求めるよりもはるかに困難である。そこで、参考のために、本論文において扱った種々の規模の爆破実験により得られた水中圧力波について、圧力最高値とエネルギー密度との関係を調べてみた。そして、坂出沖で実施された大規模な爆破により得られた結果をA、CCRを用いた水槽実験により得られた結果をB、五ヶ所湾でのダイナマイトの宙吊り爆発により得られた結果をC、電気雷管1～4本を裸で使った水槽実験により得られた結果をDとして、それぞれの実験により得られた水中圧力波について、その圧力最高値とエネルギー密度との関係を取りまとめてFig. 3.12に示した。図に見られるように、水中圧力波の圧力最高値とエネルギー密度との関係は、実施される爆破の方法、薬量などによって値そのものには大きな差が生ずるが、両者の相関関係を示す直線の勾配はいずれの爆破においてもほぼ同一となり、爆破の方法や薬量によって相関関係そのものの傾向は変わらないことがわかる。また、

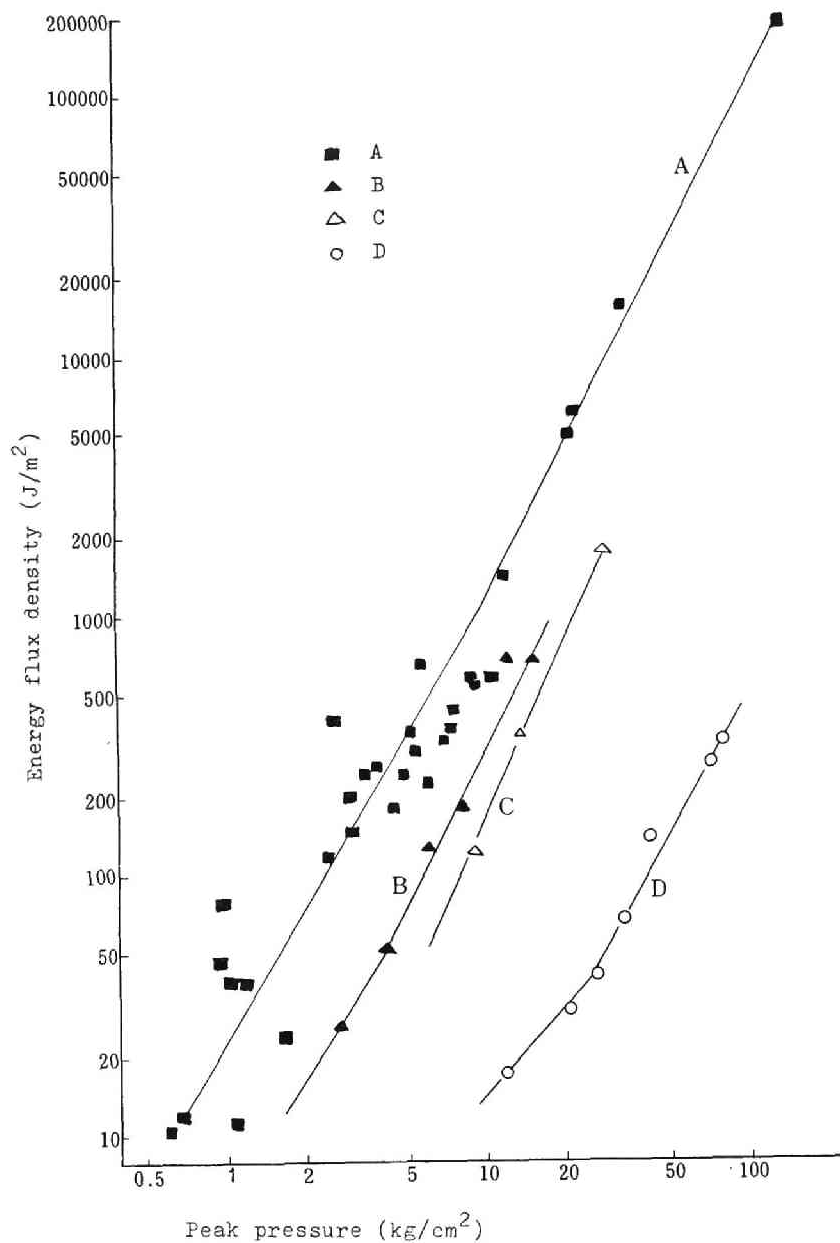


Fig.3.12 Relation between peak pressure and energy flux density of underwater pressure wave of various kinds.

このような Fig. 3.12 に示した結果は、実規模の海底爆破が行なわれたときにどのような強さの水中圧力波が生ずる可能性があるかを推定する場合に参考となるものである。

第3.4節 結 言

本章では、魚類の損傷と水中圧力波の圧力波形との関係について検討した。圧力波形に関連するパラメータとしては、圧力パルスのくり返しおよびパルス幅の2つをとりあげ、これらが魚の損傷とどのような関係にあるかを調べた。

圧力パルスが魚類に対しくり返し加わった場合には、パルス間隔が魚の損傷に対し影響を及ぼす。すなわち、同じ強さの圧力パルスが100mS以内の間隔で数回魚類に加えられても、その場合に生ずる魚類の損傷の程度は、たんに1回のみ加えられた場合のそれとほとんど差が認められない。しかし、その間隔が500mS前後以上の圧力パルスがくり返し魚に加えられた場合は、パルスが1回のみ加えられた場合にくらべて魚の損傷程度は大きくなっており、パルス間隔が大きい圧力パルスのくり返しは魚類の損傷を増加させる可能性が認められる。

魚の損傷指数と水中圧力波の圧力最高値との関係は、魚に加えられる水中圧力波のパルス幅に応じて異なってくる。同様のことが魚類の損傷指数と水中圧力波のインパルスとの関係についてもいえる。ところが、魚類の損傷指数と水中圧力波のエネルギー密度との間には、水中圧力波のパルス幅には無関係に一定の関係が見られる。したがって、水中圧力波のエネルギー密度を検討することにより、水中圧力波が魚類の損傷に及ぼす影響をより明確に議論しうることがわかった。すなわち、たとえば、供試魚として用いたコイの場合にはほぼ 140 J/m^2 の、カサゴの場合にはほぼ 100 J/m^2 の、スズキの場合にはほぼ 200 J/m^2 のエネルギー密度をもつ水中圧力波が加えられた場合には、それぞれへい死に至る重度の損傷をうけることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団，(財)総合安全工学研究所：水中発破の安全性の検討(その3)，
P.58,(1976)
- 2) 日本水産資源保護協会水中発破問題検討委員会：水中発破問題検討委員会報告，第1号，
P.64,(1975)
- 3) 若園吉一，小川輝繁，沢田保夫，阪口清次：工業火薬協会誌，31，P.81,(1970)

第4章 魚体内の力学的応答と魚類の損傷機構

第4.1節 緒 言

第2篇における前章までの検討結果によれば、水中圧力波による魚類の損傷は、魚の種類や受圧方向により差があり、また、水中圧力波のエネルギー密度と強い相関関係があることが明らかになった。そこで、これらの事柄をさらに深く検討するために、水中圧力波による魚体の力学的な応答を明確にする必要があると考える。そのために、本章に述べる研究では、実魚の腹腔内に圧力計を埋め込み、水中圧力波を受けた時の腹腔内における圧力波を測定するとともに、プラスチックで作った模型魚を用いて腹腔内の圧力、内部器官のひずみおよび加速度を測定することにより、水中圧力波による魚体内の力学的応答について検討し、さらにそれらの結果をもとにして、水中圧力波を受けることによって魚体内の内部器官がどのような機構により損傷するかについて考察した。

第4.2節 実験方法

4.2.1 供試魚

(a) 実 魚

実験用に使用した実魚は、ハマチ、マダイ、アイナメ、カサゴ、ウマヅラハギおよびアナゴの6種類である。これらの実魚は、内臓器官をいためないように殺した後冷凍して実験場所へ運搬し、実験に供する直前に解凍した。腹腔内に埋め込んだ圧力計のリード線は非常に細いので、魚の外部に取り出す電線は

0.45 mmφの電線とし、

これらとリード線との結線部はボンドで絶縁し、Fig. 4.1に示すように、魚の身の間に縫いあわせて固定した。

(b) 模型魚

模型魚は京都科学標本株式会社に依頼して製作した。使用した模型魚およびこれに装着したゲージ類の写真



Fig.4.1 Young yellowtail showing the set up of pressure gauge.

をFig.4.2に、模型魚の寸法をFig.4.3に示す。模型魚の主な仕様はつぎのとおりである。

(i) 製作会社：京都科学標本株式会社

(ii) 形 状：ハマチ型

(iii) 大きさ：Fig.4.3
に示すとおり

(iv) 材料

骨部：硬質ゴム
(ポリエス
テル樹脂)

身部：軟質ゴム
(塩化ビニ
ル樹脂)

内臓部：超軟質ゴ
ム(塩化ビ
ニル樹脂)

模型魚は実魚(ハマ
チ)から型をとって
作った。型は骨部
(頭および脊椎骨)、
右身部、左身部およ
び内臓部の4つの部

分に分けて作った。

模型魚の材料としては、力学的性質ができるだけ実魚と類似しているものという条件で上記のものを選んだ。これらの材料の粘弾性係数を岩本製作所製粘弾性スペクトロメータにて測定したが、その結果をTable 4.1に示す。Fig.4.3に示すように、模型魚の内臓部は2つ作ってあるが、そのうち内臓部Bは実魚から型をとって作ったもので、実魚の肝臓や消化器に相当するものである。一方、内臓部Aはうきぶくろおよび腎臓に相当する部分であるが、型をとることが不可能であったため、類似のものを作った。

3.3.2 実験方法

(a) 概 説

実験は東京大学工学部安全工学実験場の実験水槽(3m×5m×3.5m)を使って行なった。水槽内に爆源、供試魚(模型魚または実魚)および圧力計を配置し、爆源の爆発によって生ずる水中圧力波を供試魚に与えた場合に供試魚に生ずる加速度応答、腹腔内の圧力応答およびひず

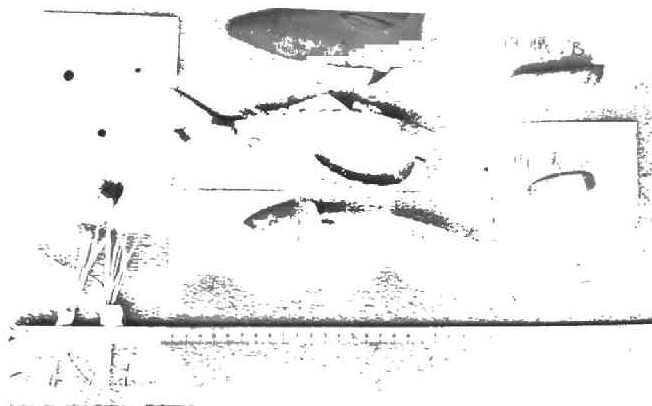


Fig.4.2 Model fish and transducers

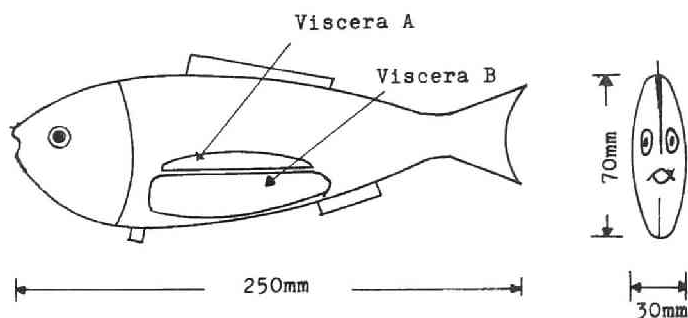


Fig.4.3 Dimension of model fish.

Table 4.1 The viscoelastic properties of materials for model fish.

Materials	Thickness of sample (mm)	Temperature (°C)	δ (degree)	G' (dyne/cm ²)	η' (poise)
Hard rubber (Bone)	0.76	5	46.5	7.708×10^9	1.164×10^7
		10	45.0	7.508×10^9	1.195×10^7
		15	46.5	7.688×10^9	1.161×10^7
		20	46.0	7.607×10^9	1.170×10^7
Soft rubber (Body)	0.59	5	23.0	1.548×10^6	1.046×10^3
		10	18.5	1.473×10^6	7.84×10^2
		15	14.5	1.406×10^6	5.37×10^2
		20	13.0	1.314×10^6	4.83×10^2
Supersoft rubber (Internal organs)	1.08	5	31.0	1.687×10^5	1.61×10^2
		10	29.5	1.525×10^5	1.37×10^2
		15	27.5	1.397×10^5	1.16×10^2
		20	26.0	1.326×10^5	1.03×10^2

Note 1) Frequency of strain in tests : 100Hz

2) G' : Dynamic elastic constant

η' : Dynamic coefficient of viscosity

δ : Phase difference between strain applied and force measured

み応答を測定した。測定用ゲージ類を取りつけた実魚および模型魚は、Fig. 4.4に示すように段ごとに固定したのち水槽内に設置した。爆源と供試魚の中心との距離は供試魚に加わる圧力波の強さが希望の値となるように調節した。なお、供試魚の位置で供試魚に加わる水中圧力波を測定したが、その方法は、第1篇第1章で説明した方法と同じである。

(b) 爆 源

本章に述べた実験には、爆源として6号電気雷管とコンクリート破砕器（旭化成社製C R旭2号，薬量30g）を使用した。電気雷管は1～6本を束ね、ビニールテープで巻いた状態で実験に供した。コンクリート破砕器は、Fig. 4.5に示すように、モルタルブロックの中に埋め込んだ状態で使用した。

(c) 測定方法

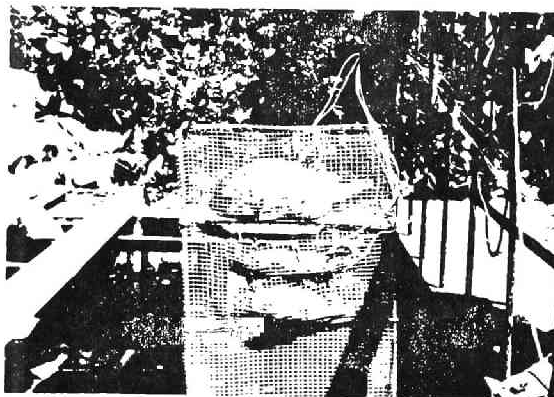


Fig.4.4 Fixed test fish.

(i) 魚の腹腔内における圧力の測定

魚の腹腔内における圧力測定にはひずみゲージタイプの圧力計の1種である共和電業社製PS-10型圧力計を使用した。この圧力計は、厚さ0.6 mm、直径6 mmの非常に小型のものである。実魚および模型魚への圧力計の取り付け方法は、それぞれFig.4.6 およびFig.4.7 に示すとおりである。圧力計の出力信号は、Fig.4.8のブロックダイアグラムに示すように、動ひずみ計(新興通信社製DS6/MTY)を通して、データレコーダ(Ampex FR-1300)およびトランジェントレコーダ(Biomation 802)に記憶させた。また別に、X-Yレコーダ(渡辺測器社製WX-481)を使って再生し、ミニコンピュータ(NOVA-01)を用いたデータ処理を行なった。

(ii) 加速度測定

使用した加速度計は半導体ゲージ型のEntrans Device EMO-500 である。

この加速度計は、大きさ2mm×2mm×6mmと非常に小型のものである。これを模型魚の腹の中に収めて魚体内部での加速度を測定した。加速度計の出力信号は、増幅器(メルカーC11)

を通してデータレコー

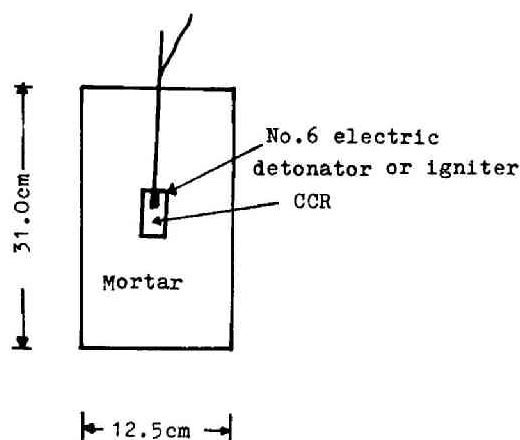


Fig.4.5 Explosion source (CCR)

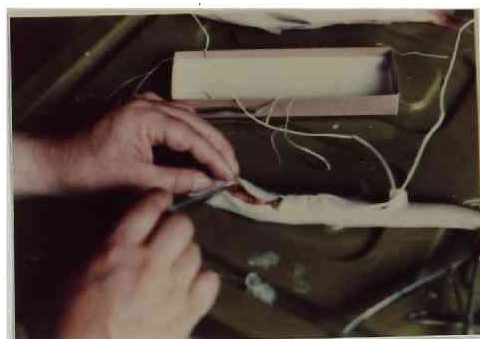
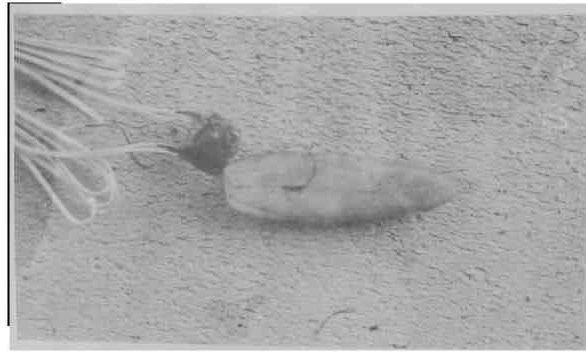


Fig.4.6 Fitting liver of conger with pressure gauge.



Fig.4.7(1) Fitting surface of viscera of model fish with pressure gauge.

ダ(Ampex FR-1300)
に収録したのち、トランジ
ェントレコーダ(Bioma-
tion 802)およびX-Y
レコーダ(渡辺測器社製
WX-481)を使用して再
生した。加速度測定系の計
器の構成をFig.4.9に示



す。

Fig.4.7(2) Fitting inside of viscera of model fish with pressure gauge.

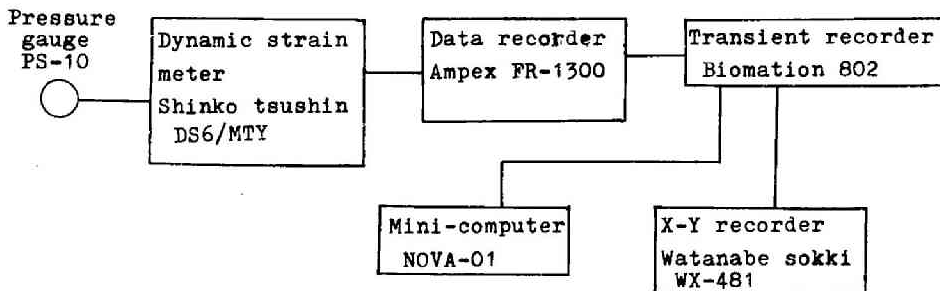


Fig.4.8 Block diagram of instrument for measurement of pressure wave in the abdominal cavity.

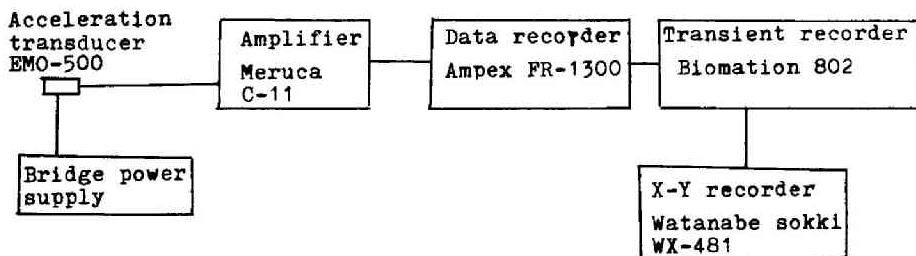


Fig.4.9 Block diagram of acceleration measurement system.

(iii) ひずみの測定

模型魚の内臓部表面および内部に抵抗線ひずみゲージを貼りつけ、内臓部の表面および内部に生ずるひずみを測定した。Fig.4.10はひずみゲージの取り付け位置を示したものである。図において、内臓AのS₁は内部に埋め込んだ1軸ゲージで、S₂, S₃, S₄は表面に貼りつけた3

軸ゲージである。
 Fig.4.11には、
 これらのひずみゲ
 ージを取りつけた
 内臓部の写真を示
 した。これらの内
 臓Aに取りつけた
 ひずみゲージは、
 脊椎骨とうきぶく
 ろに挟まれた位置
 にある腎臓に対する影
 響を検討するためのも
 のである。そこで、内
 臓Aのひずみを測定す
 る場合は内臓Bを取り
 除き、その部分にはう
 きぶくろの代用として
 ゴム風船を挿入した。
 つぎに、内臓Bに取り
 つけた S_5 は内部に埋
 め込んだ1軸ゲージで、
 S_6 、 S_7 、 S_8 はいず
 れも側面に貼りつけた
 3軸ゲージである。内
 臓Bのひずみを測定す
 る時は内臓Aを取り除
 き、その部分は空洞の
 ままで残した。

使用したひずみゲ
 ージは、共和電業社製
 KFC-2-C1-11
 (1軸ゲージ)および

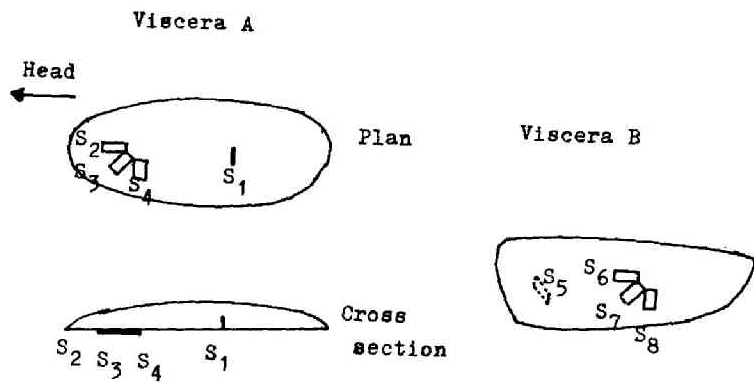
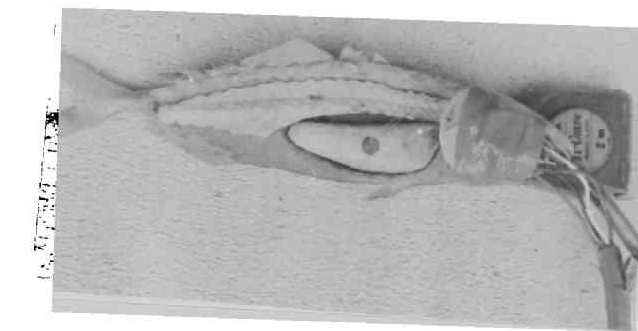


Fig.4.10 Arrangement of strain gauges.



Viscera B



Viscera A

Fig.4.11 Fitting viscera of model fish with strain gauges.

KFC-2-D-17-11(3軸ゲージ)である。ひずみゲージはブリッジ回路に結合しておき、出力信号は動ひずみ計(新興通信工業社製DS6/MTY)を通してデータレコーダ(Ampex FR-1300)に収録した。記録の再生はトランジェントレコーダ(Biomation 802)およびX-Yレコーダ(渡辺測器WX-481)により行なった。さらに、トランジェントレコーダによりAD変換したデータをミニコンピュータ(NOVA-01)に入れ、ひずみの解析を行なった。ひずみ測定系の計器構成をFig.4.12に示す。

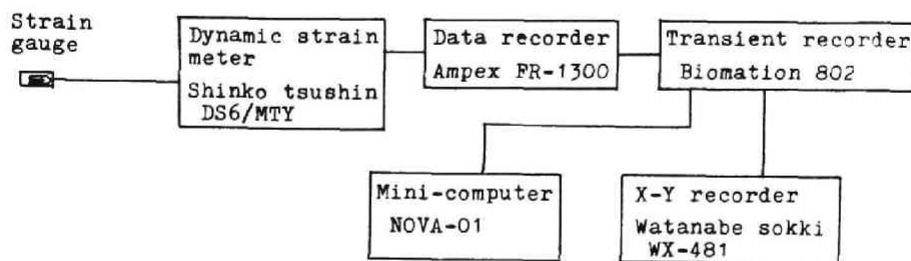


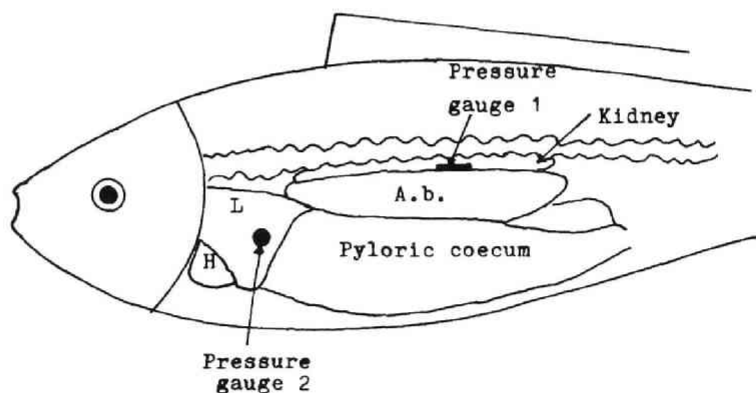
Fig.4.12 Block diagram of strain measurement system.

第4.3節 実験結果

4.3.1 実魚を用いた実験の結果

(a) ハマチ

ハマチについては、圧力計をFig.4.13に示すように、腎臓の位置(圧力計1)と肝臓の左側と右側の側部の位置(圧力計2および圧力計3)の3か所に取りつけた。これらの位置を選んだ理由はつぎのとおりである。すなわち、Fig.4.13に明らかなように、ハマチの腎臓は非常に堅い組織である背骨と非常に柔い組織であるうきぶくろに挟まれた特殊な位置に存在しており、しかもこのような存在状態は多くの魚に共通している事柄である。そこで、



L:Liver H:Heart A.b.:Air bladder

Fig.4.13 Arrangement of pressure gauges in abdominal cavity of young yellowtail.

腎臓に加わる圧力と他の内部諸器官に加わる圧力との間に差異があるかどうかは興味のある問題である。また、肝臓は内部器官の中でも比較的大きなもので、しかも代表的な器官であり、ゲージの取り付けが容易な器官でもある。なお、肝臓については、水中圧力波の受圧方向による違いの有無を観察するために、その両側にゲージを取り付けた。

実験によって得られた圧力波形の一例を、Fig.4.14 に示す。爆源に電気雷管を使った場合

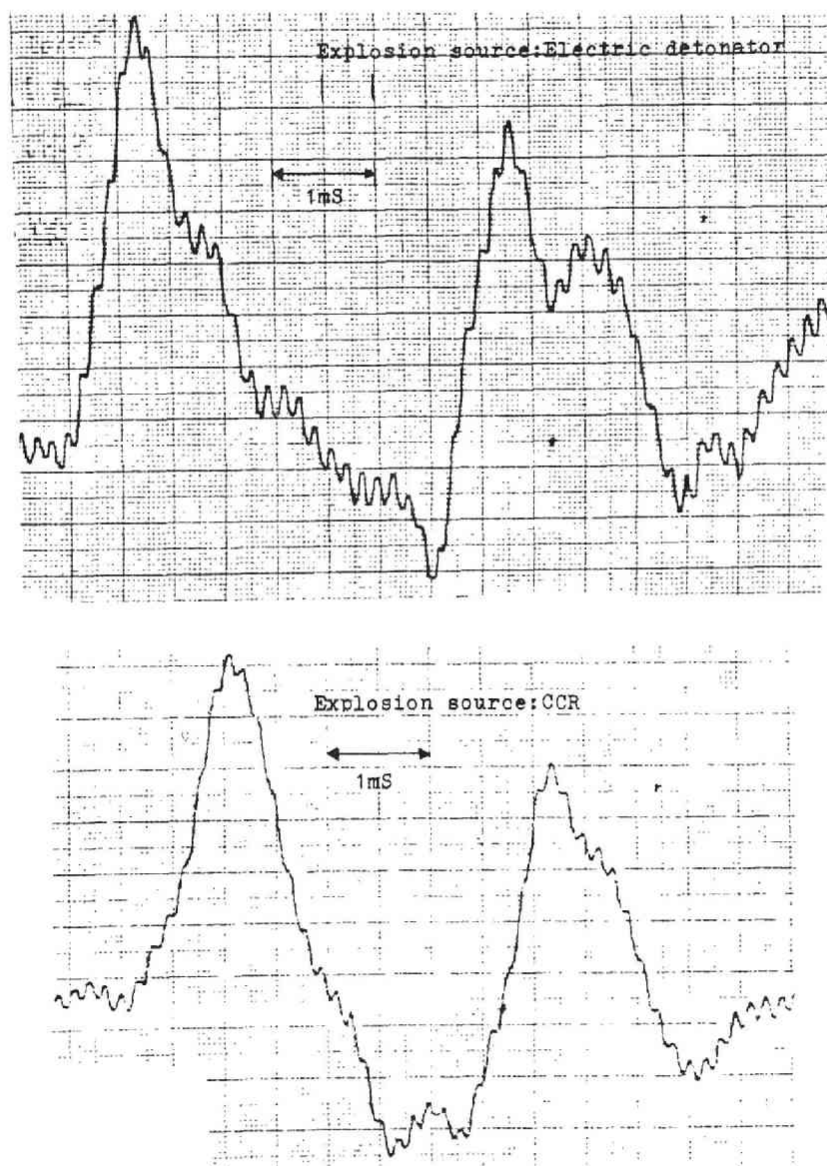


Fig.4.14(1) Examples of wave form of pressure wave measured at kidney of young yellowtail.

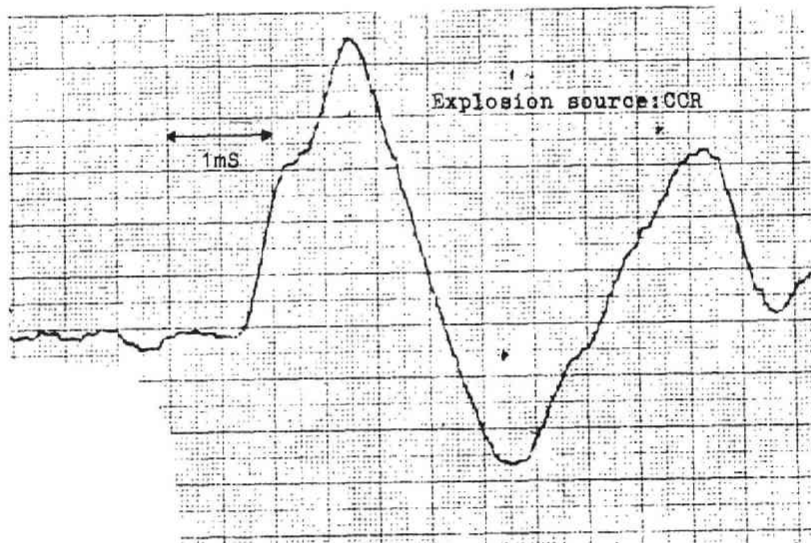
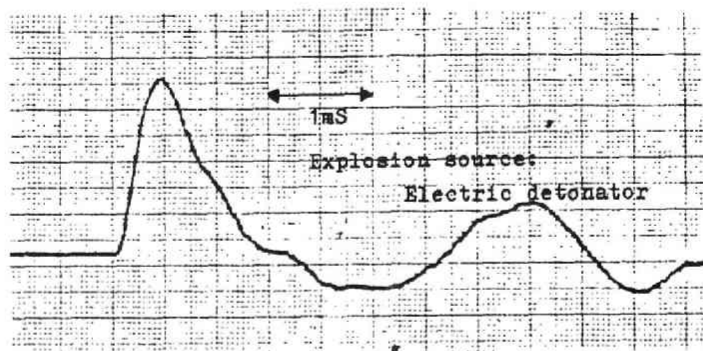


Fig.4.14(2) Examples of wave form of pressure wave measured at left side of liver of young yellowtail.

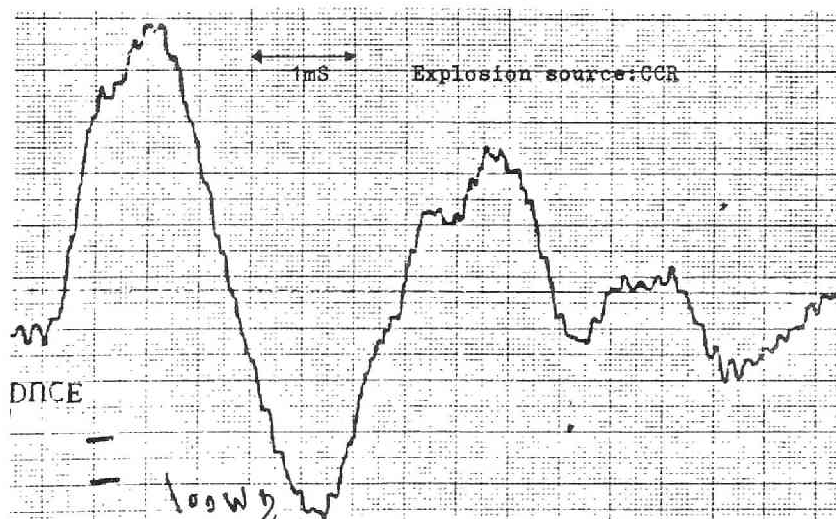
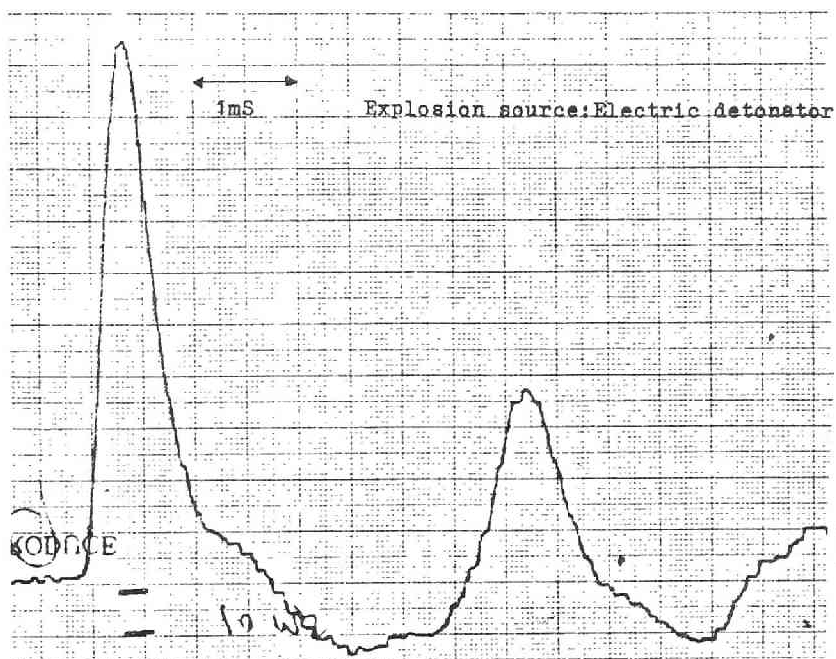


Fig.4.14(3) Examples of wave form of pressure wave measured at right side of liver of young yellowtail.

とコンクリート破砕器を使った場合とでは、すでに第1篇第1章で説明したように、生ずる水中圧力波の圧力波形は非常に異なるが、これらを受けて魚体内に生ずる圧力波形はFig.4.14に見られるように爆源の相違による差異はほとんど見られない。Table 4.2には、供試魚に加えた水中圧力波ならびに供試魚の腹腔内で測定した圧力波の圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度

Table 4.2 Properties of underwater pressure wave applied to a young yellowtail and of pressure wave in its abdominal cavity.

Explosion source	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Pressure wave in abdominal cavity								
						Kidney			Liver					
			P_m	I	E_f	P_m	I	E_f	Left side			Right side		
Electric Detonator	1	2.0	10.4	380	11.2	0.69	606	1.8	0.83	593	2.1	-	-	-
	1	2.0	10.5	380	11.0	0.57	509	1.3	0.37	465	0.86	0.44	485	1.0
	1	1.0	18.9	605	45.2	1.34	1420	8.9	1.05	1262	6.2	1.04	1330	7.0
	1	1.0	21.8	795	42.5	1.03	1000	4.6	1.84	1400	10.3	-	-	-
	3	1.0	32.4	912	131.0	3.14	2540	35.9	2.35	2500	28.0	2.40	2560	29.3
	3	1.0	35.0	1130	141.0	3.24	3180	41.9	3.46	2160	33.3	3.08	1920	26.1
	6	0.9	46.3	1300	183.0	5.62	3840	101.0	5.07	5820	130.0	4.32	3880	76.4
CCR	6	1.0	53.8	2340	287.0	6.87	4000	128.0	4.35	3310	76.4	-	-	-
	1,I*	1.0	0.7	768	2.2	0.42	564	1.1	0.40	620	1.2	0.31	460	0.7
	1,D*	2.0	2.2	1100	5.3	1.32	1130	6.8	1.08	1210	6.0	0.89	997	4.5
	1,D*	1.0	3.5	1910	14.0	2.45	2210	24.7	2.02	2780	29.5	-	-	-
CCR	3,D*	1.0	9.6	6190	112.0	5.50	5200	130.0	4.55	6200	140.0	-	-	-

Note N.D.: Number of electric detonator
R : Distance from explosion source
 P_m : Peak pressure (kg/cm^2)
I : Impulse ($\text{g}/\text{S}\cdot\text{cm}$)
 E_f : Energy flux density (J/m^2)

*Initiation of CCR
I: Igniter
D: Detonator

の値を示した。ただし、インパルスおよびエネルギー密度については前章（第2篇第3章）において説明した方法により求めた値を示した。また、圧力波形からエネルギー密度を求めるには、魚体の密度と魚体内での音速の値が必要であるが、実魚の内臓諸器官についてのこれらの値は不明なため、便宜上これらの計算には水の密度と水中での音速の値を用いた。したがって、腹腔内で測定された圧力波について求めたエネルギー密度の値は、比較のためのたんなる相対値として取り扱われるべきものである。

(b) その他の魚種

そのほか、マダイ、アイナメ、カサゴ、ウマツラハギおよびアナゴの5種類の魚については、いずれも肝臓の左側面に圧力計を取りつけて圧力測定を行なった。これらの実験に使用した爆源はいずれも電気雷管である。その結果得られた圧力波形の一例をFig. 4.15に示す。また、測定された水中圧力波と腹腔内圧力波のそれぞれについて求めた圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度の値をTable 4.3に示す。

なお、参考のために、これらの供試魚の体長をTable 4.4に示す。

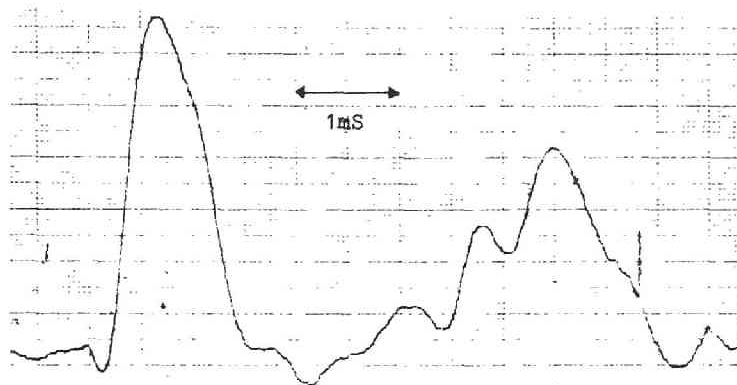


Fig.4.15(1) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of sea bream.

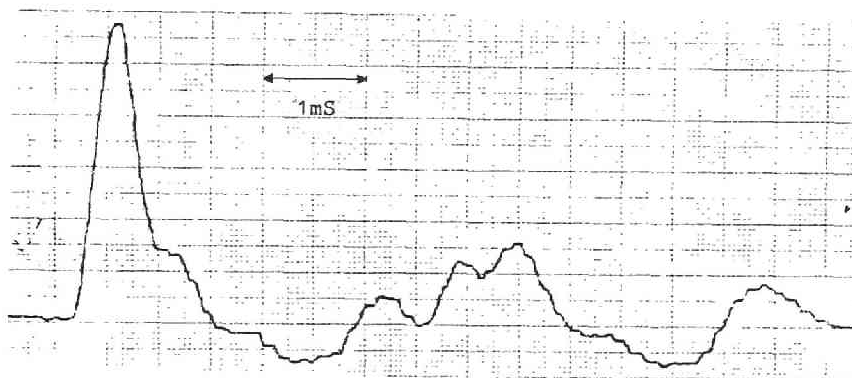


Fig.4.15(2) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of rock trout.

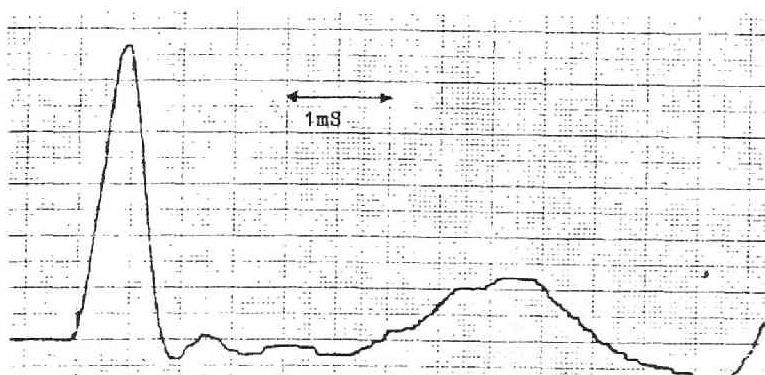


Fig.4.15(3) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of scorpionfish.

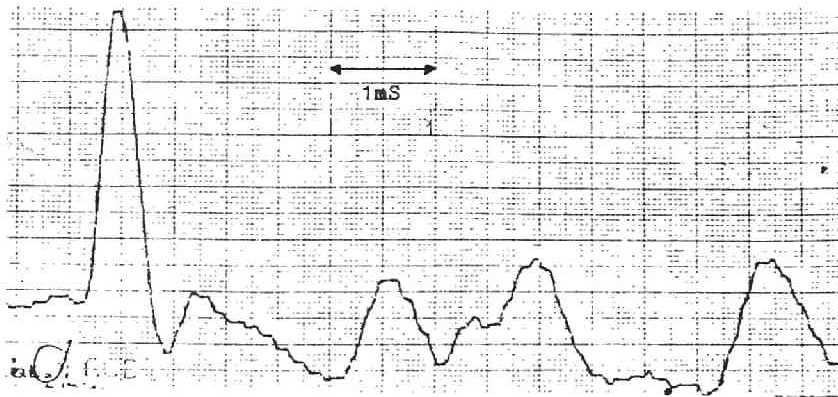


Fig.4.15(4) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of filefish.

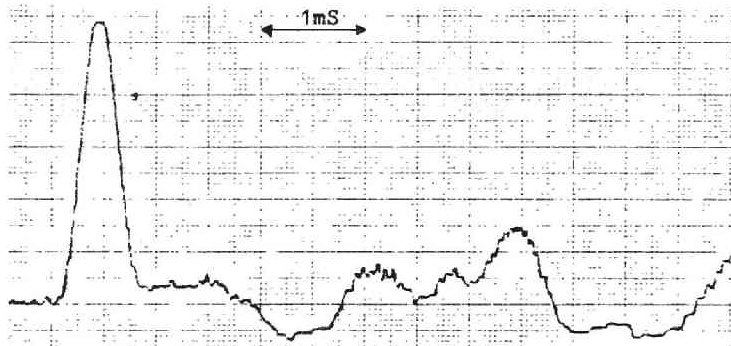


Fig.4.15(5) Example of wave form of pressure wave measured at left side of liver of conger.

Table 4.3 Properties of underwater pressure wave applied to fishes and of pressure wave in their abdominal cavity.

Fishes	Underwater pressure wave			Pressure wave in abdominal cavity		
	P_m (kg/cm^2)	I ($\text{g}/\text{S.cm}$)	E_f (J/m^2)	P_m (kg/cm^2)	I ($\text{g}/\text{S.cm}$)	E_f (J/m^2)
Sea bream	39.8	1950	149	3.93	3076	62.0
	35.2	1770	141	4.53	3310	74.1
Rock trout	39.8	1950	149	3.76	2098	34.4
	35.2	1770	141	4.20	2319	45.0
Scorpionfish	39.8	1950	149	4.56	2064	45.5
	35.2	1770	141	3.80	1930	35.5
Conger	38.4	2100	138	4.31	1876	36.5
	38.3	2360	140	3.76	1945	28.3
Filefish	38.4	2100	138	3.82	1669	27.5

Note P_m :Peak pressure
 I :Impulse
 E_f :Energy flux density

Table 4.4 Length of fish used for experiments.

Fish	Length (cm)	Fish	Length (cm)
Young yellowtail	49.5	Sea bream	24.0
Rock trout	19.5	Scorpionfish	19.2
Conger	19.5	Filefish	21.0

4.3.2 模型魚を用いた実験の結果

(a) 腹腔内における圧力測定結果

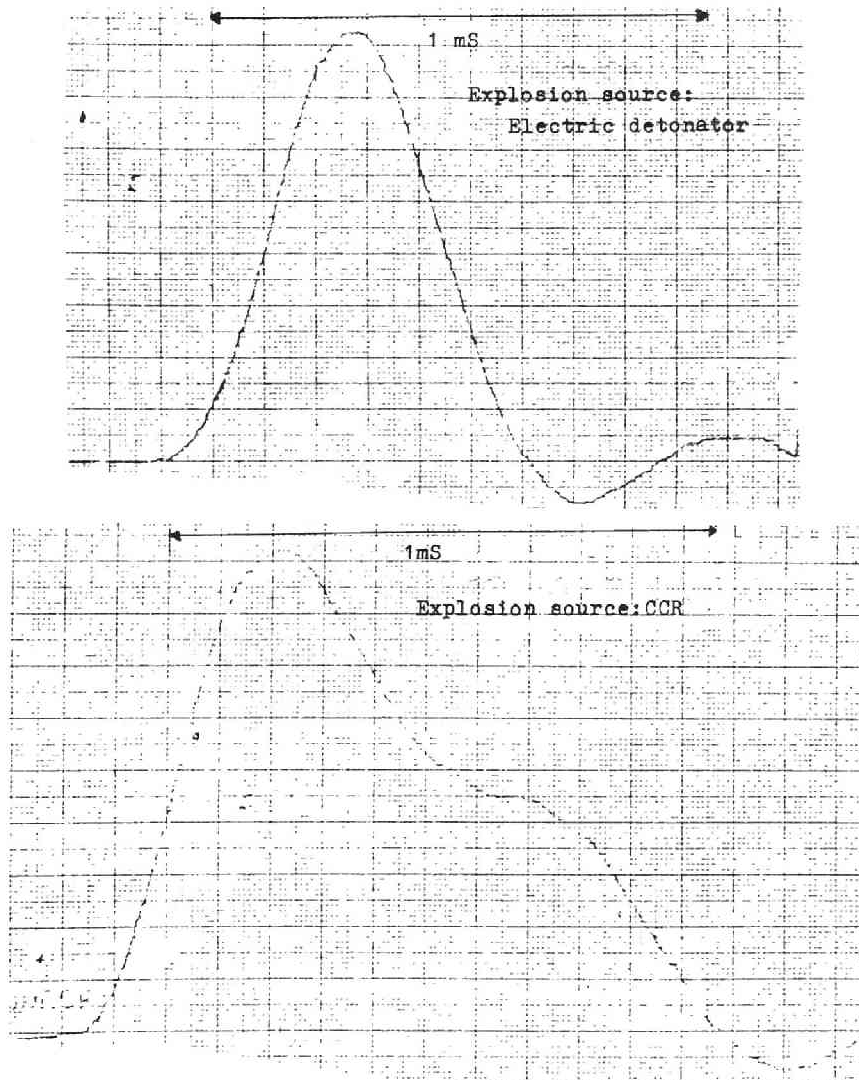


Fig.4.16(1) Examples of wave form of pressure wave measured in the abdominal cavity of model fish.
(Inside of viscera)

先に述べたように、模型魚については、圧力計を臓器の中に埋め込んだ場合と臓器表面に貼りつけた場合のそれぞれについて腹腔内に生ずる圧力を測定した。

爆源として電気雷管およびコンクリート破砕器を用いた場合に得られた圧力波形の一例をFig.

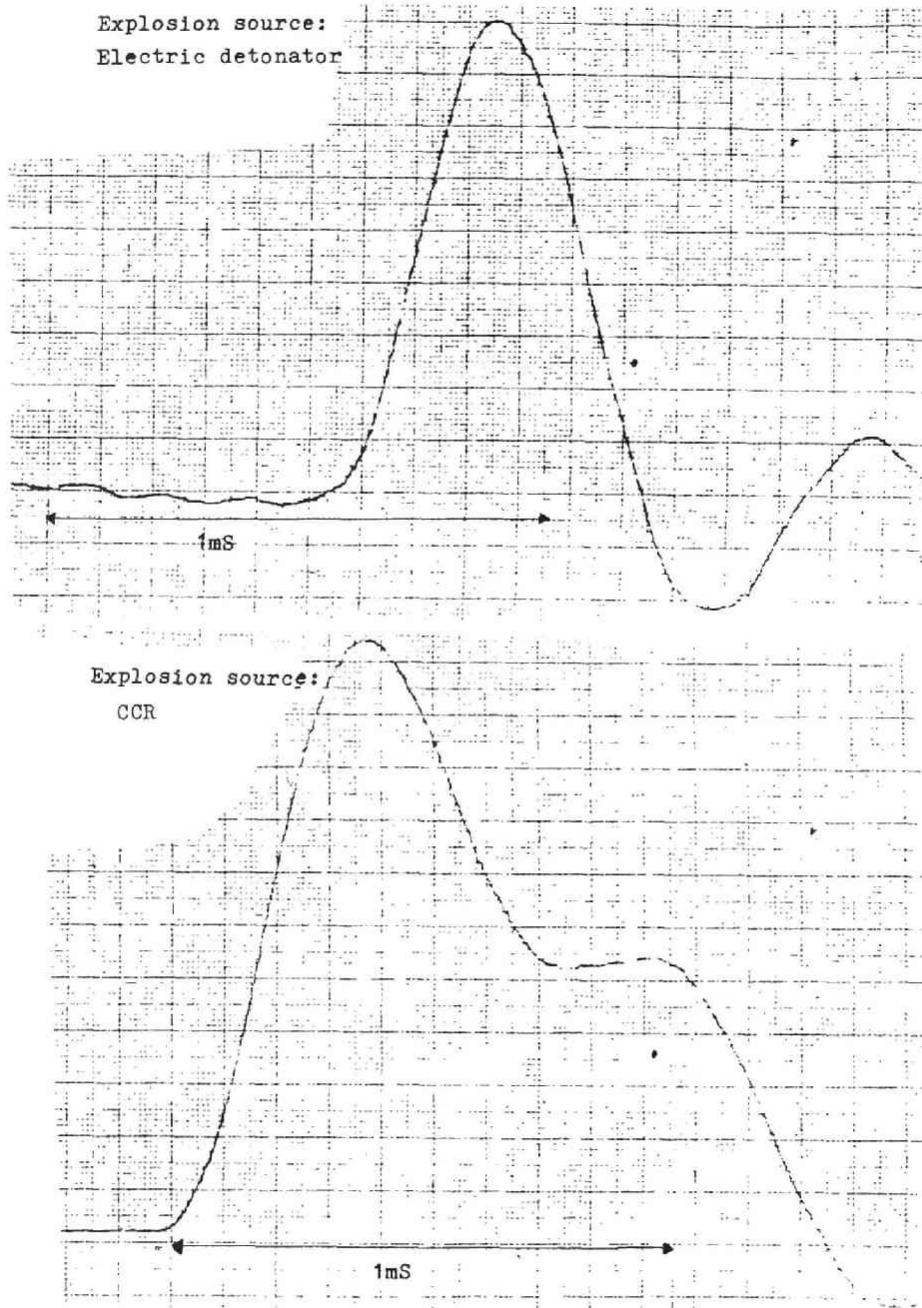


Fig.4.16(2) Examples of wave form of pressure wave measured
in the abdominal cavity of model fish.
(Surface of viscera)

4.16 に示す。また前項と同様に、これらの実験により測定された水中圧力波および腹腔内圧力波について求めた圧力最高値、インパルスおよびエネルギー密度の値を Table 4.5 に示す。

Table 4.5 Properties of underwater pressure wave applied to model fish and of pressure wave in its abdominal cavity.

Explosion source	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Pressure wave in abdominal cavity					
			P_m	I	E_f	Inside of viscera			Surface of viscera		
						P_m	I	E_f	P_m	I	E_f
Electric Detonator	1	1.5	14.8	267	10.4	1.49	502	3.6	1.48	548	3.8
	1	1.5	16.3	311	15.3	1.76	582	4.9	1.78	640	5.5
	1	1.0	21.2	518	35.6	2.80	928	12.8	2.66	982	12.8
	1	1.0	26.2	1230	63.3	3.41	1160	19.8	2.63	1010	13.1
	2	1.0	30.4	861	79.2	4.38	1540	32.9	3.42	1360	22.8
	2	1.0	32.1	1700	116.0	4.05	1390	27.7	3.90	1670	29.7
	3	1.0	38.6	1890	185.0	4.97	1690	41.3	5.03	1920	46.8
CCR	3	1.0	40.6	1710	120.0	4.81	1610	38.0	3.66	1360	24.1
	1,D*	1.5	3.1	1600	11.6	1.91	1120	10.7	1.97	1030	9.0
	1,D*	0.8	5.6	2790	32.2	3.35	2150	30.9	3.02	2200	30.0
	1,D*	0.8	6.7	3250	49.8	4.72	2850	56.0	3.91	2770	49.0
	1,D*	0.5	9.2	3170	85.0	4.82	3120	66.2	4.64	3100	65.7
	1,D*	0.5	10.4	4750	133.0	6.28	3550	92.8	5.10	3420	77.9
	2,D*	0.8	11.5	7770	188.0	6.16	4140	105.0	5.49	5980	123.0

Note

N.D.: Number of detonator

R : Distance from explosion source

P_m : Peak pressure (kg/cm²)

I : Impulse (g/S.cm)

E_f : Energy flux density (J/m²)

*Initiation of CCR

I: Igniter

D: Detonator

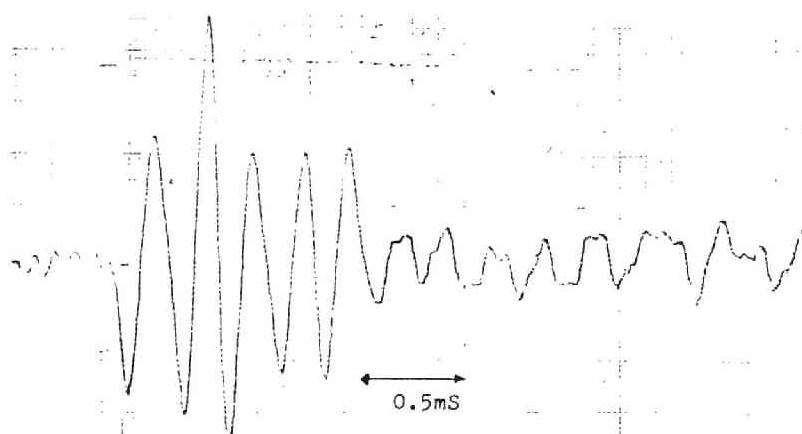
(b) 魚体内における加速度測定結果

模型魚の魚体内部で測定した加速度波形の一例を Fig. 4.17 に示す。また、これらの実験において、模型魚の受けた水中圧力波の諸特性値と魚体内で測定した加速度の正および負のピーク値を Table 4.6 に示した。

(c) 腹腔内におけるひずみの測定結果

模型魚については、魚体内の内臓 A および B についてそれぞれの内部および表面におけるひずみを測定した。これらのうち、 S_1 ゲージおよび S_5 ゲージはそれぞれの内臓の内部に埋め込んだもので、他はいずれも内臓表面に貼り付けたものである。これらのゲージにより測定したひずみ波形の例を Fig. 4.18 に示す。また、これらの実験で、模型魚が受けた水中圧力波の諸特性値と内臓 A, B の内部および表面で測定されたひずみの大きさを Table 4.7 に示す。なお、

Table 4.7に
おいて、ひずみの
大きさはPeak to
Peak (P-P)
の値で示した。



Explosion source:Electric detonator
Direction against explosion source:Lateral

Fig.4.17 Example of wave form of acceleration measured
in the interior of model fish body.

Table 4.6 Properties of underwater pressure wave applied
to model fish and its peak acceleration.

Explosion source	Direction	N.D.	R (m)	Underwater preaaure wave			Peak acceleration (G)	
				P_m	I	E_f	Positive	Negative
Electric detonator	Lateral	1	2.5	8.9	328	6.8	295	-280
		1	2.5	9.3	333	7.1	299	-303
		2	2.0	15.0	352	12.1	446	-429
		2	2.0	16.9	365	14.8	557	-543
		2	2.0	16.5	325	15.9	695	-783
		1	1.0	20.4	410	25.7	1120	-1180
	Ventral	1	1.0	21.6	395	23.9	1320	-1220
		1	2.0	11.9	413	14.0	694	-725
		1	2.0	13.4	424	14.1	250	-273
		3	2.5	17.9	371	13.5	667	-694
	Head	1	2.5	9.8	313	6.8	626	-580
	Caudal	1	2.5	7.7	217	5.8	571	-619
		1	2.5	8.9	270	6.5	473	-579
CCR	Lateral	1,D*	1.0	4.1	924	7.5	412	-407
		1,D*	1.5	3.1	994	10.7	385	-390
		1,D*	1.5	2.8	692	6.2	272	-281
		1,D*	1.5	2.9	732	6.9	348	-339

Note

N.D.:Number of detonator or CCR
R :Distance from explosion source
 P_m :Peak pressure (kg/cm²)
I :Impulse (g/S·cm)
 E_f :Energy flux density(J/m²)

*Initiation of CCR
I:Igniter
D:Detonator

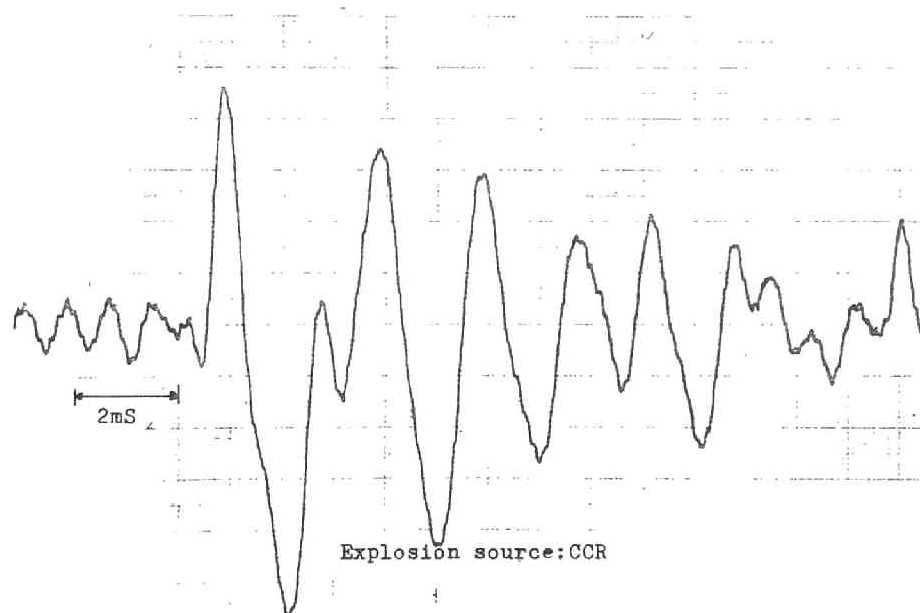
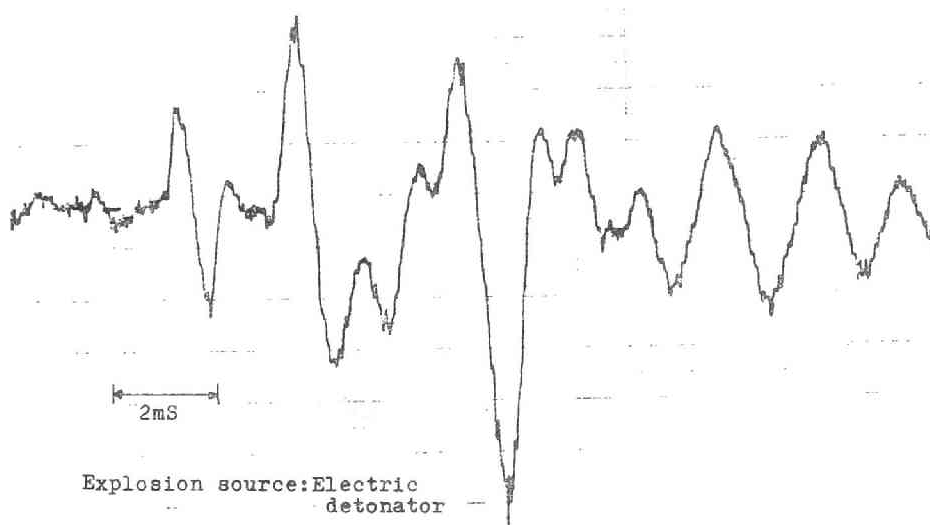


Fig.4.18(1) Examples of wave form of strain wave measured on the inside of viscera A of model fish.

(Gauge: S_1)

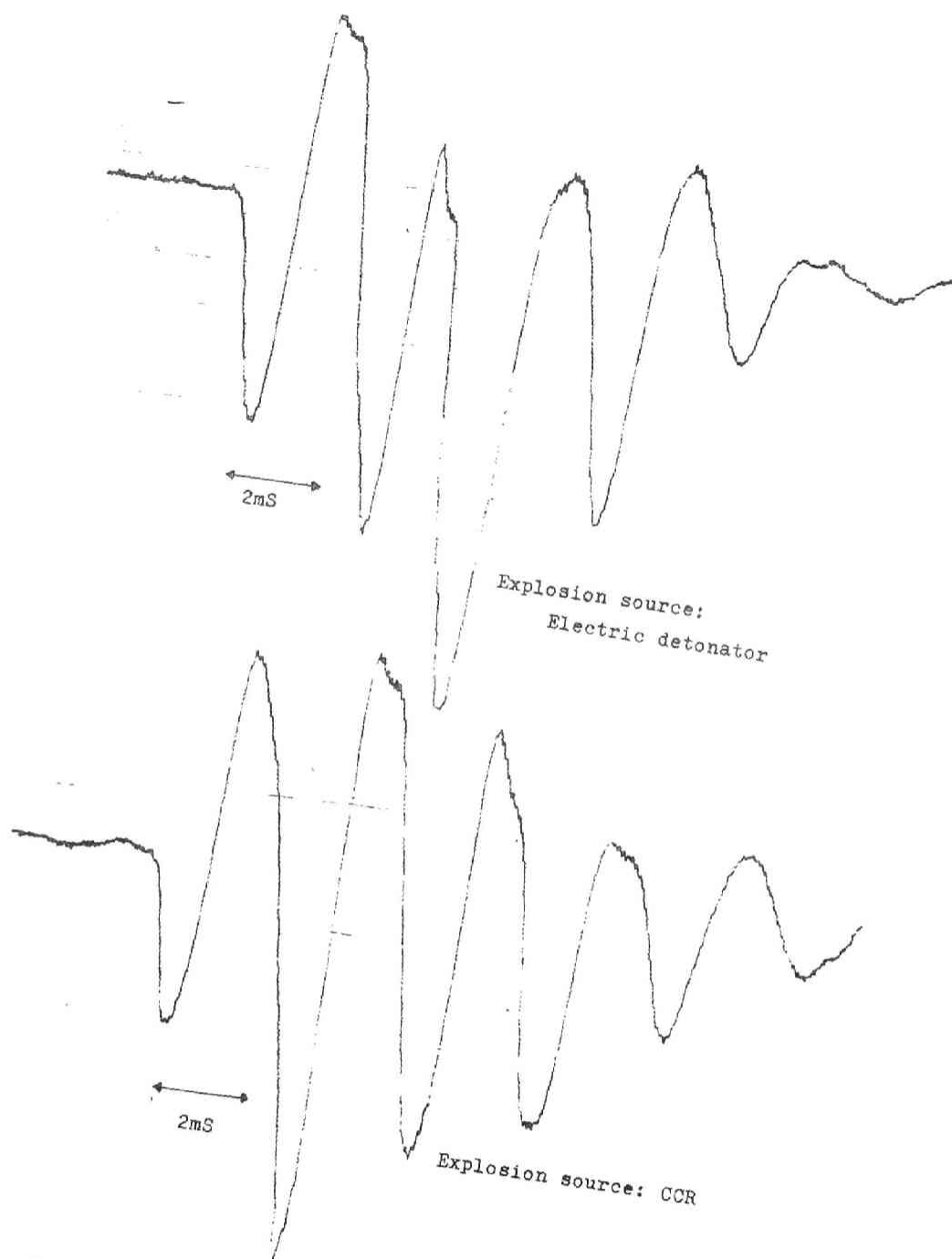


Fig.4.18(2) Examples of wave form of strain wave measured
at the angle of 45 degree to long axis of
model fish on the surface of its viscera A.
(Gauge: S_3)

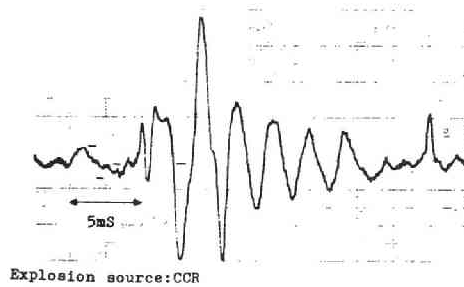
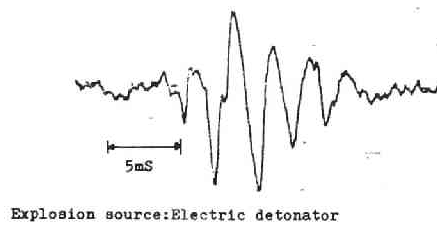


Fig.4.18(3) Examples of wave form of strain wave measured
on the inside of viscera B of model fish.
(Gauge:S₅)

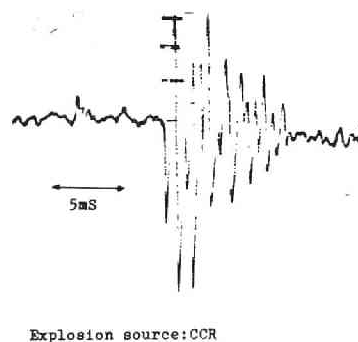
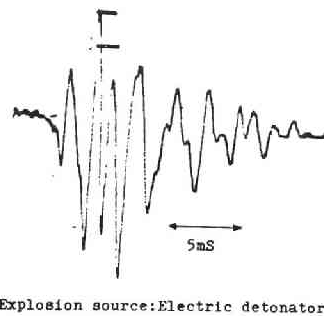


Fig.4.18(4) Examples of wave form of strain wave measured
at the angle of 45 degree to horizontal axis
on the surface of viscera B of model fish.
(Gauge:S₇)

Table 4.7(1) Properties of underwater pressure wave applied to model fish and strain on the inside of its viscera A.

Explosion source	Direction	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Magnitude of strain P-P (μ strain)
				P_m (kg/cm ²)	I (g/S.cm)	E_f (J/m ²)	
CCR	Ventral	1,I*	1.0	0.5	245	0.5	50
		1,I*	1.0	0.5	268	0.8	95
		1,D*	2.5	1.4	490	2.3	137
		1,D*	2.0	2.2	730	5.5	180
		1,D*	2.0	2.1	734	5.9	200
		1,D*	2.0	2.2	752	6.0	193
	Caudal	1,I*	1.0	0.5	238	0.4	70
Electric detonator	Ventral	1	2.5	8.2	234	6.4	153
		1	2.5	9.7	255	7.3	175
		2	2.0	13.8	379	14.6	210
		2	2.0	15.9	465	20.9	235
		1	1.2	19.7	583	31.6	208
		1	1.2	20.0	633	35.5	232
		3	1.1	30.9	1120	93.8	305
		5	1.0	42.5	1580	162.0	301
	Lateral	1	1.0	23.5	743	46.8	270
		1	1.0	24.7	820	56.2	290
	Head	1	1.2	19.1	618	33.9	286
		1	1.2	20.2	640	36.3	268
		1	1.0	23.1	743	46.8	284
		3	1.1	29.1	1000	79.4	296
	Caudal	1	1.0	25.3	825	57.6	278
		1	1.0	24.9	811	55.0	295

Note

N.D.: Number of detonator or CCR
R : Distance from explosion source
 P_m : Peak pressure
I : Impulse

E_f : Energy flux density
*Initiation of CCR
I: Igniter
D: Detonator

Table 4.7(2) Properties of underwater pressure wave applied to model fish and principal strain on the surface of its viscera A.

Explosion source	Direction	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Magnitude of principal strain P-P (μ strain)
				P_m (kg/cm ²)	I (g/S·cm)	E_f (J/m ²)	
CCR	Ventral	1,I*	1.0	0.6	356	1.1	690
		1,I*	1.0	0.6	415	1.2	690
		1,D*	2.5	1.3	440	1.9	950
		1,D*	2.5	1.7	570	2.9	1340
		1,D*	2.5	1.8	663	3.8	1360
		1,D*	2.0	2.2	720	6.3	1740
Electric detonator	Ventral	1	2.5	8.6	225	5.8	1120
		1	2.3	9.8	262	7.4	1670
		1	2.3	10.1	274	8.3	1400
		1	2.3	10.2	281	8.4	1740
		1	1.2	19.3	591	30.9	2030
		1	1.0	21.3	680	40.7	2210
		1	1.0	22.1	751	48.4	2410
	Lateral	1	2.5	8.3	212	5.4	1120
		1	2.5	8.3	208	5.3	1100
	Head	1	2.5	7.7	190	4.6	1160
		1	2.5	7.8	203	4.6	1180

Note

N.D.:Number of detonator or CCR

R :Distance from explosion source

P_m :Peak pressure

I :Impulse

E_f :Energy flux density

*Initiation of CCR

I:Igniter

D:Detonator

Table 4.7(3) Properties of underwater pressure wave applied to model fish and strain on the inside of its viscera B.....

Explosion source	Direction	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Magnitude of strain P-P (μ strain)
				P_m (kg/cm ²)	I (g/S.cm)	E_f (J/m ²)	
CCR	Ventral	1,D*	1.5	3.0	820	9.3	60
		1,D*	1.0	3.7	910	14.4	67
		1,D*	1.0	4.2	1110	17.6	70
		1,D*	0.7	6.1	1650	39.4	82
		1,D*	0.7	6.0	2000	42.2	78
		1,D*	0.7	6.5	2230	49.0	78
		1,D*	0.5	7.0	2450	58.9	79
		1,D*	0.5	7.1	2510	61.7	80
	Lateral	1,D*	0.7	6.5	2250	49.6	95
		1,D*	0.7	6.7	2390	56.2	91
	Head	1,D*	0.5	7.7	2740	75.0	80
		1,D*	0.5	8.3	3010	90.2	83
Electric detonator	Ventral	1	2.3	10.1	270	8.2	55
		1	2.3	9.8	281	8.7	58
		1	2.0	11.8	342	13.3	50
		1	2.0	13.2	366	14.1	58
		1	1.2	18.1	520	24.3	73
		1	1.2	18.3	555	26.0	76
		3	1.0	32.6	1160	102.0	88
		3	1.0	33.1	1200	108.0	83
	Lateral	1	1.0	12.3	350	12.3	47
		1	1.0	12.6	356	13.2	58
		1	1.0	13.5	395	14.1	61
		1	2.5	8.9	225	6.8	45
	Head	1	2.5	9.5	246	6.9	45
		1	2.5	8.4	221	5.8	46
	Caudal	1	2.5	9.1	215	6.5	52

Note

N.D.:Number of detonator or CCR

R :Distance from explosion source

P_m :Peak pressure

I :Impulse

E_f :Energy flux density

*Initiation of CCR

I:Igniter

D:Detonator

Table 4.7(4) Properties of underwater pressure wave applied to model fish and principal strain on the surface of its viscera B.

Explosion source	direction	N.D.	R (m)	Underwater pressure wave			Magnitude of principal strain P-P (μ strain)
				P_m (kg/cm ²)	I (g/s·cm)	E_f (J/m ²)	
CCR	Ventral	1,D*	1.0	4.2	1280	20.0	1360
		1,D*	1.0	5.0	1740	30.4	1550
		1,D*	0.7	6.4	2260	49.6	1280
		1,D*	0.7	7.0	2500	61.7	1250
		1,D*	0.5	7.9	2790	77.6	1200
	Lateral	1,D*	0.7	6.5	2250	50.7	1400
		1,D*	0.7	6.8	2380	56.5	1360
	Head	1,D*	0.5	7.6	2730	72.4	1310
		1,D*	0.5	8.4	2930	89.1	1300
Electric detonator	Ventral	1	2.5	8.3	213	5.4	970
		1	2.5	8.3	225	5.9	1060
		1	2.0	11.3	318	11.1	1100
		2	2.0	16.9	514	24.8	1130
		2	2.0	16.5	523	25.7	1180
		2	1.0	31.8	1180	103.5	1370
		2	1.0	32.3	1250	107.0	1280
	Lateral	1	2.3	9.2	238	6.8	930
		1	2.3	10.0	258	7.3	870
		1	2.0	12.8	360	13.3	920
		1	2.0	13.2	368	14.3	1150
	Head	1	2.3	9.1	240	6.8	690
	Caudal	1	2.3	8.5	219	5.8	1000
		1	2.3	9.0	233	6.5	970

Note

N.D.:Number of detonator or CCR

R :Distance from explosion source

P_m :Peak pressure

I :Impulse

E_f :Energy flux density

*Initiation of CCR

I:Igniter

D:Detonator

第4・4節 実験結果の考察

4・4・1 腹腔内における圧力測定結果の考察

(a) 実魚を用いた実験

実魚を用いた実験は6種類の魚種について行なったが、Fig. 4.14 (2) および Fig. 4.15 (1)～(5)に明らかなように、爆源に同じ電気雷管を用い、同一場所（肝臓、左側面）で測定した圧力波形については魚種による差異がほとんど見られないので、ここでは代表的に供試魚としてハマチを用いて得られた圧力波形を対象にして考察する。

i) 圧力波形について

爆源として同じ電気雷管とコンクリート破砕器を用い、これらを水中爆発させたときに測定した水中圧力波の波形例を示した Fig. 3.5 と、ハマチの腹腔内で測定した圧力波の波形例を示した Fig. 4.14 を比較すると、これら両者の波形が全く異なっていることがわかる。すなわち、電気雷管を爆源に用いた場合の水中圧力波は一般にパルス的な波形を示し、圧力の立ち上がり時間が数 μS 以内で、圧力がほぼ零の値まで低下するまでの継続時間も数10～100 μS 程度である。これに対し、同じ電気雷管を爆源に用いてハマチの腎臓で測定した圧力波は、波形が振動的で立ち上がり時間が約750 μS であり、初動の^幅パルスも約2600 μS と長い。また、コンクリート破砕器を爆源とした場合にも、水中圧力波の立ち上がり時間は20～600 μS 、パルス幅は800～2000 μS であるのに対し、ハマチの腎臓で測定した圧力波のそれらの値はそれぞれ約750 μS および約2600 μS となっている。このように、水中圧力波については、爆源の種類によってパルス幅に大きな差が見られるが、ハマチの腎臓付近で測定した圧力波については、いずれの爆源を用いても、圧力の立ち上がり時間およびパルス幅で代表される波形的な特徴にほとんど差が見られない。

ハマチの肝臓の左右の側面に取りつけた圧力計で測定された圧力波形について検討してみる。この場合の実験はハマチの左腹側部から水中圧力波が加わるようにして行なったものである。まず、ハマチの肝臓の左側面と右側面で測定された圧力波には、波形的な差異はほとんど認められない。また、電気雷管を爆源に用いた場合に得られた圧力波形では、圧力の立ち上がり時間が約450 μS 、パルス幅は約1500 μS であるが、コンクリート破砕器を爆源に用いた場合に得られる圧力波形では、それらの値がそれぞれ約1160 μS および約2000 μS となっており、後者を爆源とした場合の方が立ち上がり時間、パルス幅ともにやや長くなっている。しかし、この差は、魚に加えられた水中圧力波の波形と肝臓の腹側部で測定した圧力波との間に認められる波形的な差にくらべれば非常に小さいものである。

つぎに、Fig. 4.15 は、爆源には電気雷管を用い、種々の魚の肝臓の左側面に取りつけた圧力計により測定した圧力波形を示したものであるが、これらの圧力波形について、圧力の立ち上

がり時間とパルス幅を求めた結果を Table 4.8 に示す。Table 4.8 によれば、圧力波の

Table.4.8 Rise time and pulse width of pressure waves
measured on the left side of livers of fishes.

Fish	Rise time (μ S)	Pulse width (μ S)	Fish	Rise time (μ S)	Pulse width (μ S)
Sea bream	450	1370	Filefish	290	630
Rock trout	420	1340	Conger	400	790
Scorpionfish	480	870			

立ち上がり時間はウマヅラハギを除く他の魚種では400～480 μ Sであって、ハマチの場合のそれと変りはない。ウマヅラハギの場合にはこの立ち上がり時間がやや小さいが、これはウマヅラハギの腹部の身が非常に薄いことに関連があると考えられる。一方、パルス幅は魚種によってかなり差があり、腹部の身の厚いものほどパルス幅が長くなっている傾向が見られる。

さて、ハマチを除く5種類の魚の肝臓左側面について行なった圧力測定では、Table 4.3に示したように、これらの魚に加えられた水中圧力波のエネルギー密度がほぼ140 J/m²と一定になるようにして実験を行なった。そこで、先に第3章に示した結果および昭和50年に本州四国連絡橋公団が坂出沖で実施した水中発破実験¹⁾の結果より、水中圧力波のエネルギー密度が140 J/m²のときの供試魚のうち4種類の損傷指数を求めると、アイナメでは2.0、アナゴでは2.1、カサゴでは3.6、マダイでは4.1となる。このようにして求めた損傷指数の値とTable 4.8に示した各魚種について得られた圧力波の波形的な特徴を比較すれば明らかなように、腹腔内で測定された圧力波の波形的な特徴とこれらの魚の損傷との間には直接的な相関関係が認められない。

ii) 圧力波の強さについて

Fig. 4.19 は、供試魚（ハマチ）に加えた水中圧力波の圧力最高値と腹腔内の腎臓および肝臓で測定した圧力波の圧力最高値との関係を示したものである。腎臓で測定した場合も、肝臓側面で測定した場合も、爆源別に整理した。これらの両者の間には明らかに相関関係が認められる。しかし、異なった爆源を用いた場合に得られた両者の関係を1本の直線で整理することができない。このことは、加える水中圧力波の波形が類似しているものについては、水中圧力波と腹腔内で測定される圧力波のそれぞれの圧力最高値に相関関係が認められるが、水中圧力波の波形が異なる場合には上記のような相関関係が得られないことを意味している。

一方、先に第3章において、魚の内部器官の損傷が魚に加えられる水中圧力波のエネルギー密度と良い相関関係を有することを明らかにした。そこで、ここではさらに、水中圧力波のエネルギー密度と試料魚（ハマチ）の腹腔内で測定された圧力波の諸特性値との関係について検討してみる。Fig. 4.20 は、腹腔内圧力波の諸特性として圧力最高値、インパルスおよびエ

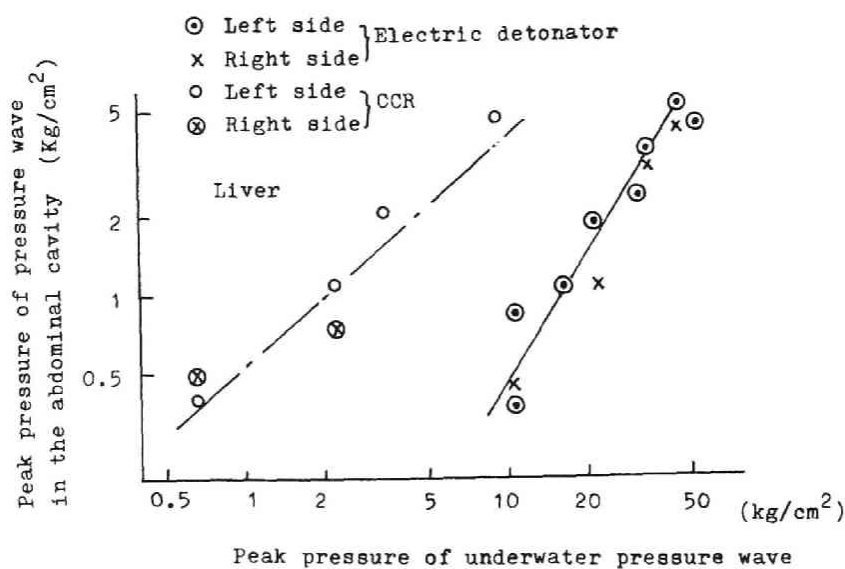
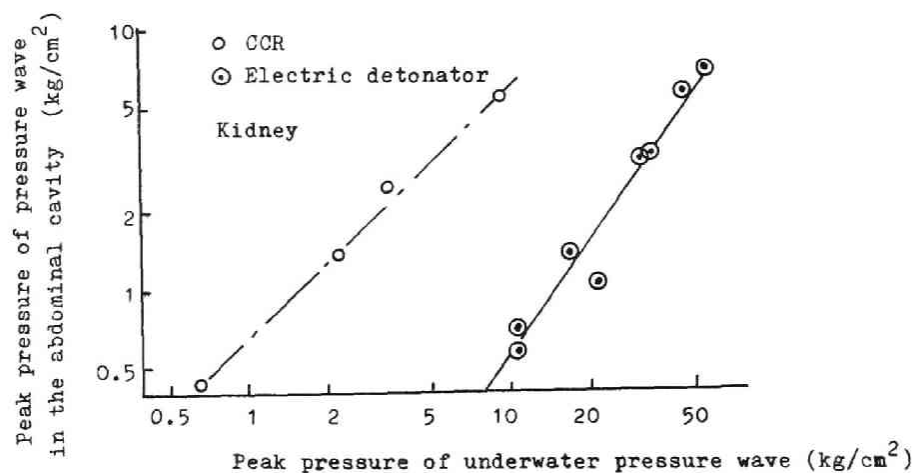


Fig.4.19 Relation between peak pressure of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of young yellowtail.

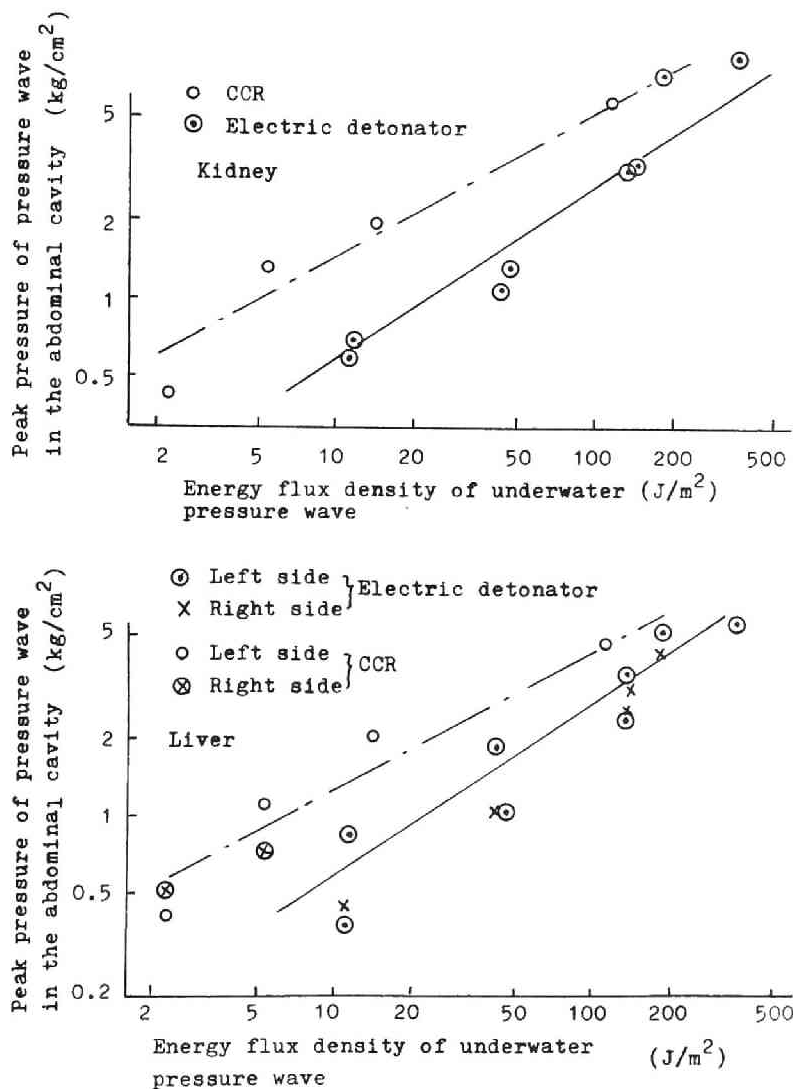


Fig.4.20(1) Energy flux density of underwater pressure wave and peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of young yellowtail.

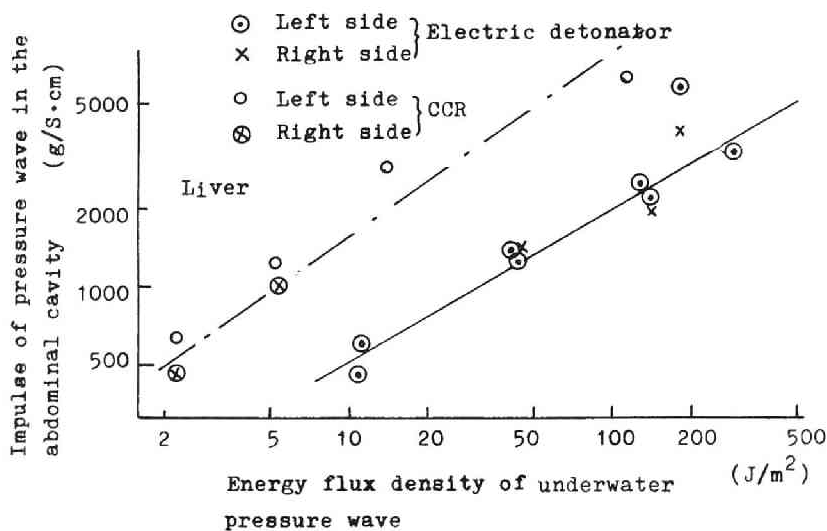
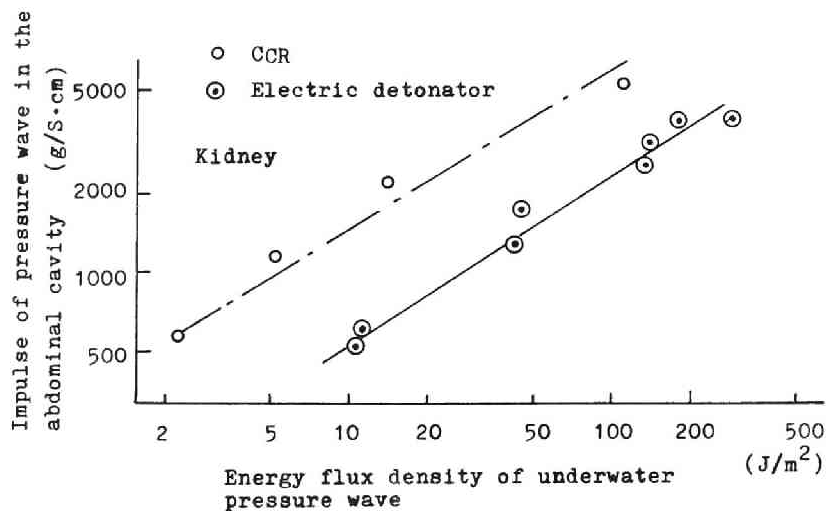


Fig.4.20(2) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and impulse of pressure wave in the abdominal cavity of young yellowtail.

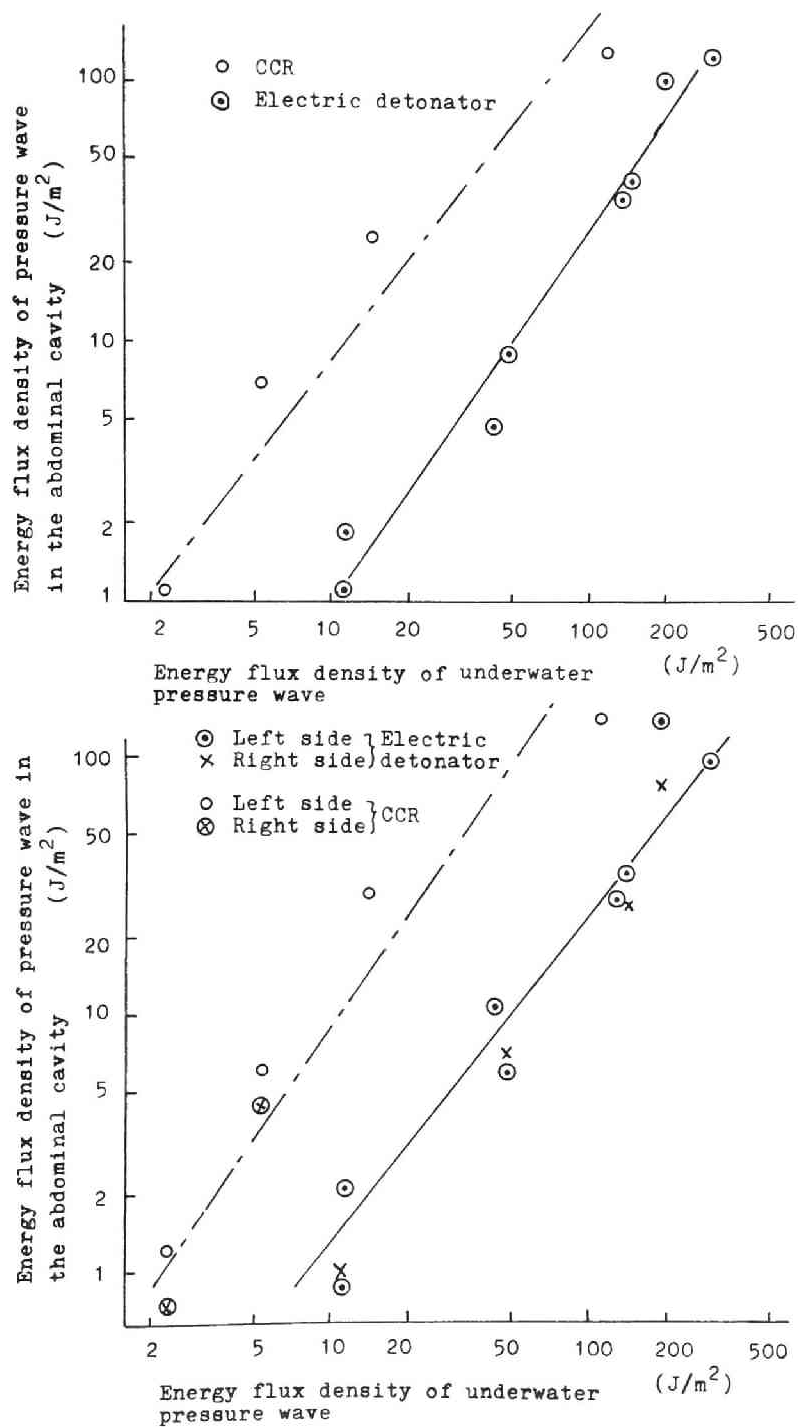


Fig.4.20(3) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of young yellowtail.

エネルギー密度をとり、これらの諸特性と加えた水中圧力波のエネルギー密度との関係を示したものである。Fig. 4.20 によれば、爆源別に整理した結果については、腹腔内圧力波の特性のそれぞれが水中圧力波のエネルギー密度と相関関係をもつといえるが、異なった爆源を用いて得られた結果については必ずしも良い相関関係があるとはいえない。しかし、Fig. 4.20 (1) に示した腹腔内圧力波の圧力最高値と水中圧力波のエネルギー密度との間においては、爆源別に示したこれらの両者の関係を示す2つの直線がかなり接近しており、とくにこのことは肝臓側面で測定した圧力波の場合に著しい。いいかえれば、外部から魚に加えられる水中圧力波のエネルギー密度が同一であれば、その波形が異なっても腹腔内の肝臓表面には最高圧がほぼ同じ圧力波を感じることを示している。

(b) 模型魚を用いた実験

i) 圧力波形について

模型魚の腹腔内で測定した圧力波形を示した Fig. 4.16 について、圧力の立ち上がり時間およびパルス幅を求めた結果を Table 4.9 に示す。Table 4.9 より、爆源別に考えれば、内臓表面においてもその内部においても、圧力の立ち上がり時間およびパルス幅のいずれの値に

Table 4.9 Rise time and pulse width of pressure wave in abdominal cavity of model fish.

Inside of viscera			Surface of viscera		
Explosion source*	Rise time (μ S)	Pulse width (μ S)	Explosion source*	Rise time (μ S)	Pulse width (μ S)
E.D.	360	640	E.D.	360	720
CCR	400	1300	CCR	380	1260

*E.D.:Electric detonator

もほとんど差がないことがわかる。この表に示した圧力の立ち上がり時間およびパルス幅の値は実魚であるハマチについて得られたそれらの値にくらべて多少短かいが、オーダ的には一致しており、また、圧力波形も実魚と模型魚との間に大きな差異は見られない。このことから考えると、模型魚の内臓に用いた材料の粘弾性特性と実魚の内臓のそれとはかなりよく似ているものと思われる。

ii) 圧力波の強さについて

模型魚について測定した腹腔内圧力波の圧力最高値と加えた水中圧力波の圧力最高値との関係を Fig. 4.21 に示した。実魚の実験結果について指摘したのと同様に、Fig. 4.21 に示した結果においても、これら両者の関係は、異なった爆源で得られる圧力波については同一の関係で結びつけ得ないことがわかる。

つぎに、水中圧力波のエネルギー密度と模型魚について測定した腹腔内圧力波の諸特性との関

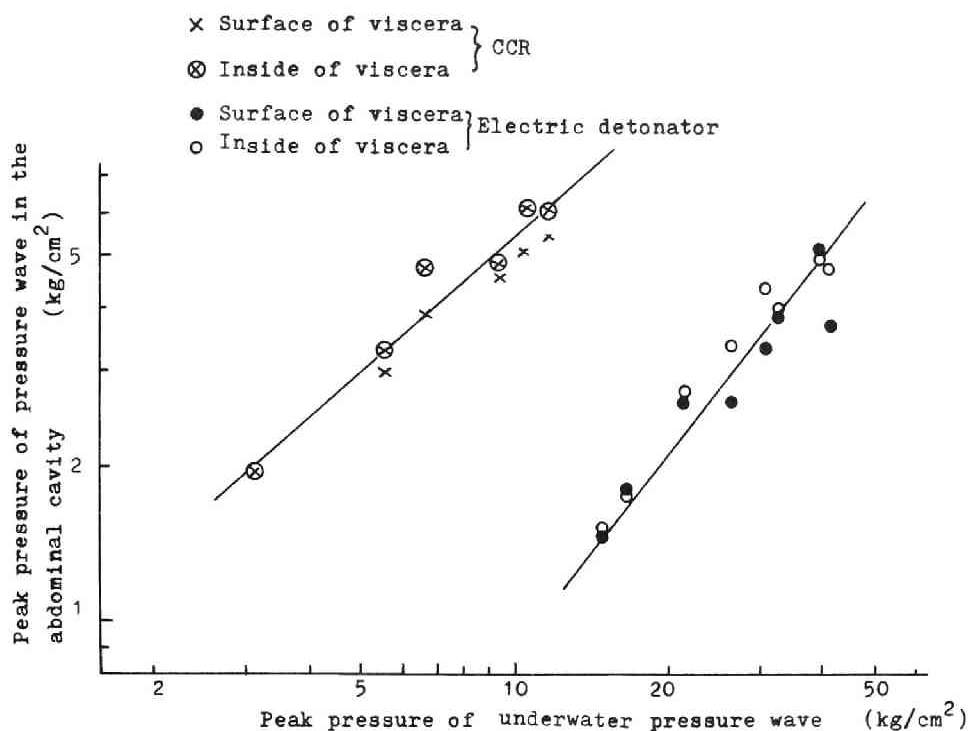


Fig.4.21 Relation between peak pressure of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

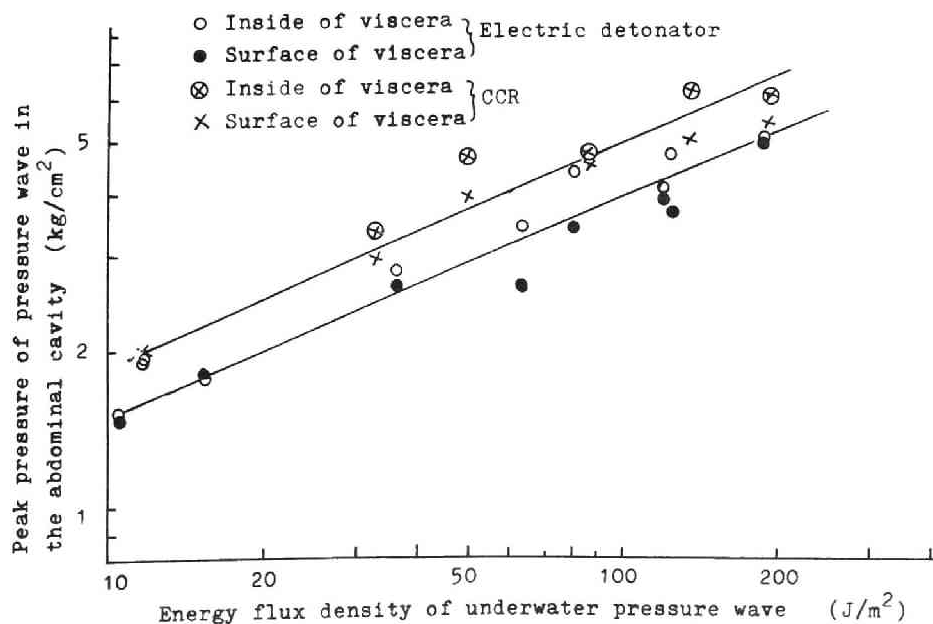


Fig.4.22(1) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

係を明らかにするために、水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波の圧力最高値、インパルス、エネルギー密度との関係をそれぞれ Fig. 4.22 (1)～(3) に示した。これらの図から明らかなように、模型魚について得られた腹腔内圧力波の場合にも、腹腔内圧力波の圧力最高値と加えた水中圧力波のエネルギー密度との間においてのみ、爆源の種類には無関係に比較的近似した相関関係が認められ、このことは、実魚のハマチについて得られた結果とも一致している。

4.4.2 魚体内における加速度測定結果の考察

Fig. 4.17 に示した加速度波形は、その卓越周波数が4～5 KHzの振動波形であって、しかも正と負のピーク値に大きな差が認められない。また、加速度のピーク値は、Table 4.6 に示したように大きい、その周波数が高いため、魚体の変位はさして大きくないものと考えられる。

つぎに、魚体内で測定した加速度最高値とその際魚体に加えられた水中圧力波の圧力最高値、

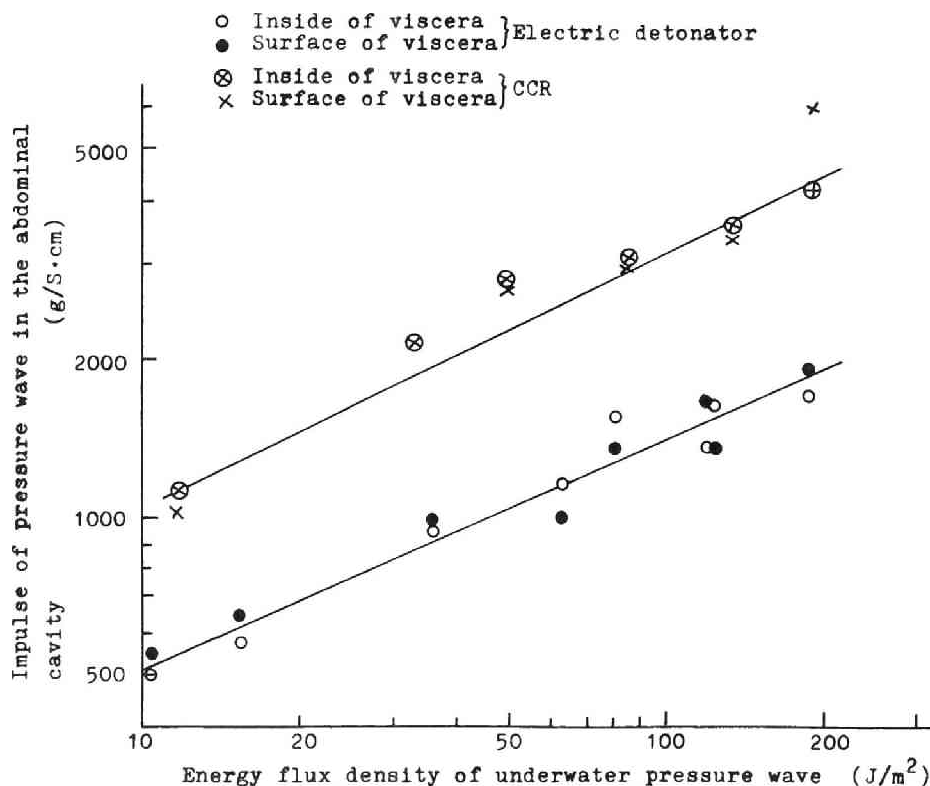


Fig.4.22(2) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and impulse of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

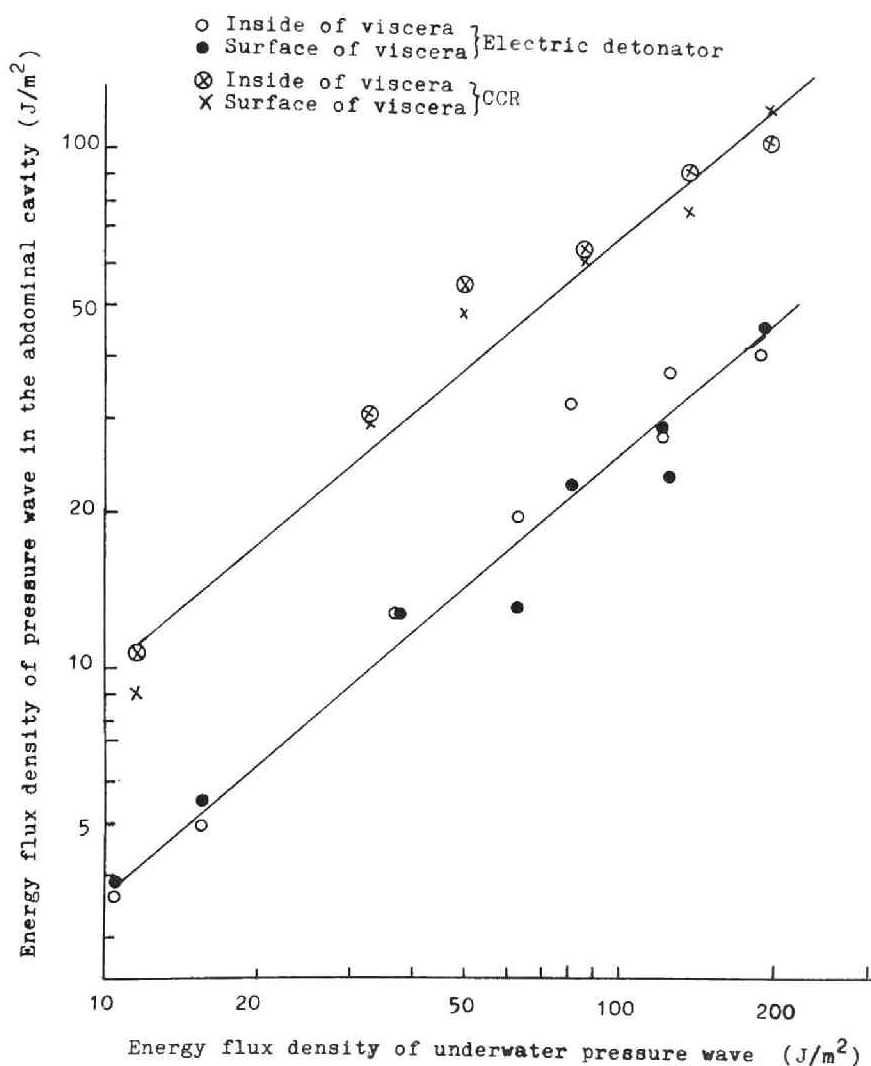


Fig.4.22(3) Energy flux density of underwater pressure wave and that of pressure wave in the abdominal cavity of model fish.

インパルスおよびエネルギー密度との関係を示すと、Fig. 4.23 のようになる。Fig. 4.23 によれば、異なった爆源を用い、したがって、生ずる水中圧力波の波形が異なる場合であっても上記の水中圧力波の3つの特性のうち、水中圧力波のエネルギー密度のみが魚体内に生ずる加速度最高値と正の相関関係があることがわかる。

4.4.3 腹腔内におけるひずみ測定結果の考察

第3章第3.3節で明らかにしたような魚類の損傷はそれに加えられる水中圧力波のエネルギー

一密度と相関性がある。
 また一方、水中圧力波のエネルギー密度と魚類の腹腔内で測定された圧力波の圧力最高値との間にも正の相関関係が認められることを、4.4.1項において指摘した。これらのことを併せ考えると、水中圧力波による魚類の内部器官の損傷に対しては、腹腔内における圧力波の圧力最高値となんらかの関係があるものと推定される。

そこで、ここでは、模型魚の腹腔内で測定されたひずみの大きさと腹腔内圧力波の圧力最高値との関係について考察してみる。ただし、今回の実験では、模型魚の腹腔内に圧力計とひずみゲージを同時に取りつけることが困難であったため、実験にあたっては、水中圧

力波の大きさとそれらの水中圧力波を受けたときの腹腔内のひずみを同時に測定した。したがって、別の測定により求めた水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波の圧力最高値との関係を利用して、ひずみ測定時の腹腔内圧力波の圧力最高値を求めることにした。すなわち、Fig.4.22(1)は水中圧力波のエネルギー密度と腹腔内圧力波の圧力最高値との関係を示したものであるが、この結果を用いて最小自乗法により水中圧力波のエネルギー密度 E_f (J/m^2) と腹腔内圧力波の圧力最高値 $F P_m$ (Kg/cm^2) との関係とを求めると、爆源別にそれぞれ次式に示す関係

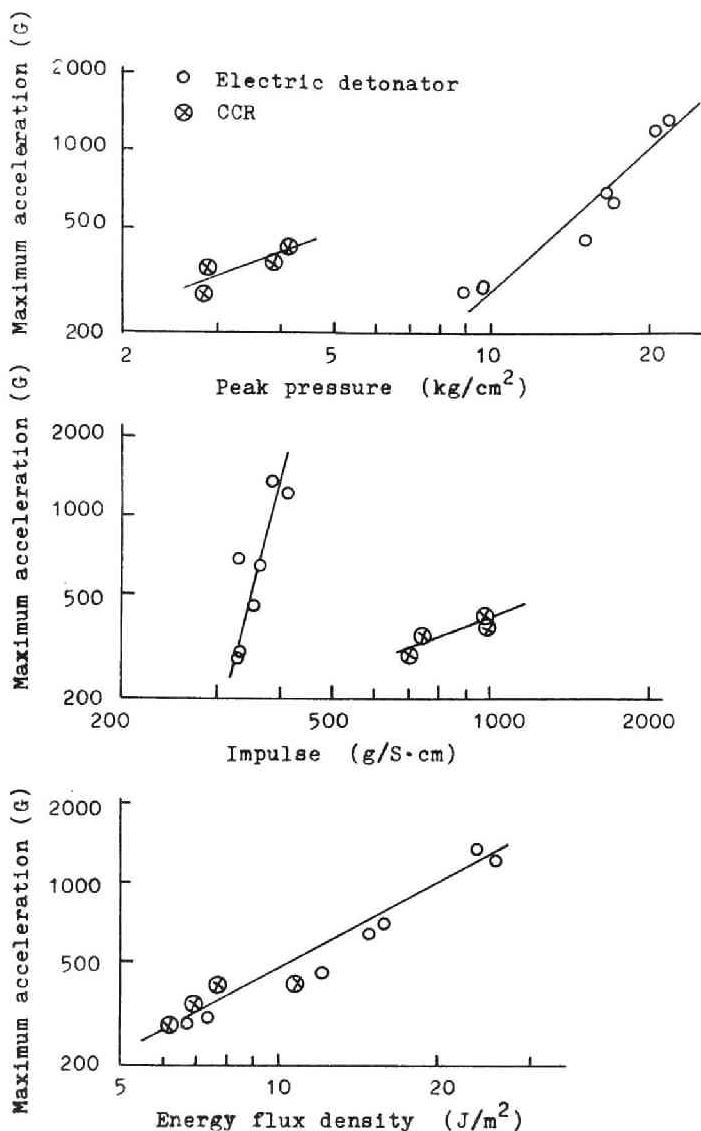


Fig.4.23 Relation between properties of underwater pressure wave and maximum acceleration measured in the interior of model fish.

が得られる。

電気雷管を爆源とした場合：

$$FP_m = 0.708 E_f^{0.423} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

コンクリート破砕器を爆源とした場合：

$$FP_m = 0.558 E_f^{0.420}$$

そこで、ひずみ測定実験の際に同時に測定した水中圧力波のエネルギー密度の値を(4.1)式に代入し、その際模型魚の腹腔内に生じた腹腔内圧力波の圧力最高値を求め、これらの圧力最高値と腹腔内で測定し

たひずみの大きさ(Peak to Peak)との関係をFig. 4.24 に示した。図においては、魚類にどの方向から水中圧力波を加えたかの区別をVentral, Lateral, Head, Caudal として示した。

Fig. 4.24 より、腹腔内圧力波の圧力最高値と腹腔内に生じたひずみの大きさとの間には相

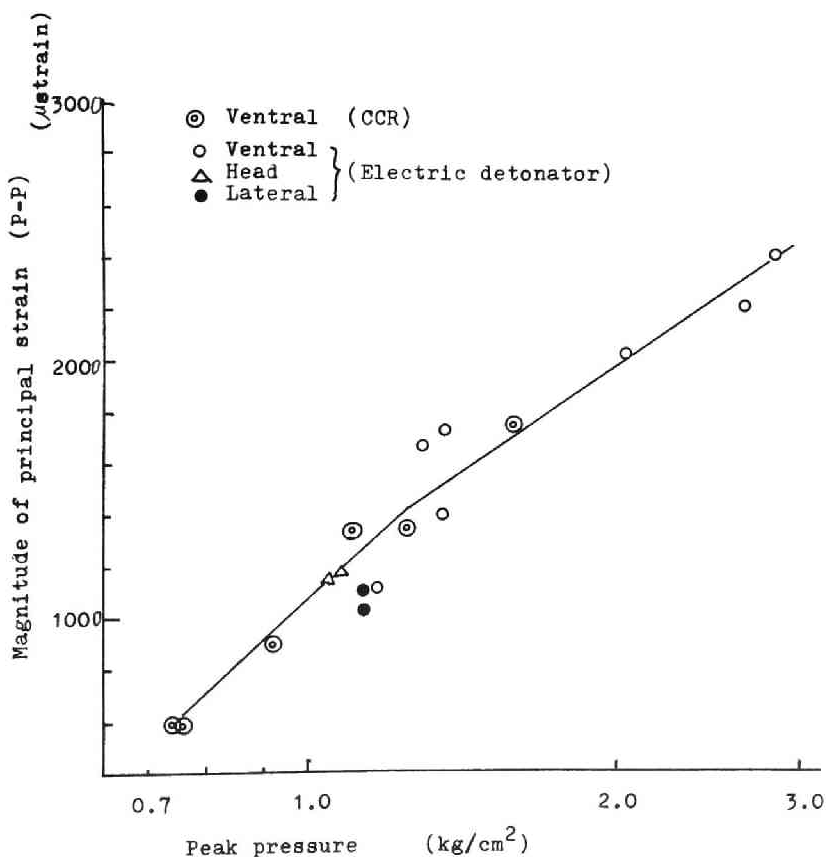


Fig.4.24(1) Relation between peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of principal strain on the surface of its viscera A.

関性が認められ、この関係は水中圧力波の波形に影響されないことがわかる。そこで、腹部から水中圧力波を受けた場合のデータをもとに、ひずみ振幅の最高値 $\epsilon (\mu\text{strain})$ と腹腔内圧力波の圧力最高値 $FP_m (\text{kg/cm}^2)$ との関係を最小自乗法によって整理して求めると、それぞれ次式に示す結果が得られる。

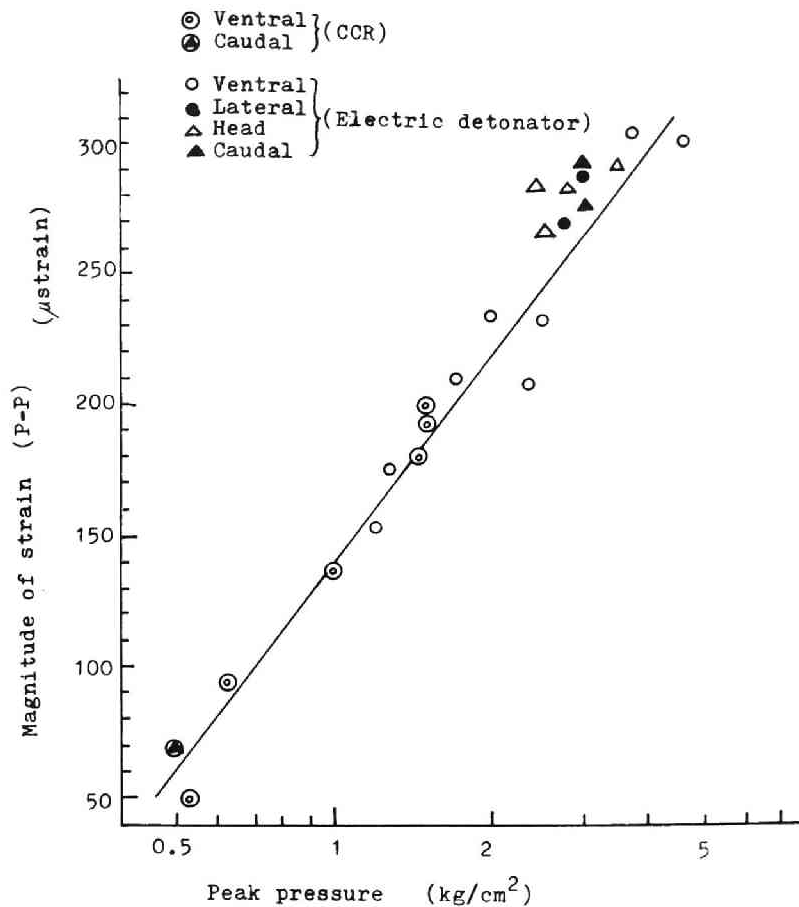


Fig.4.24(2) Relation between peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of strain on the inside of its viscera A.

内臓Aの内部におけるひずみ：

$$\epsilon = 139 + 113 \ln FP_m$$

内臓Aの表面における主ひずみ：

$$\epsilon = 1140 + 1200 \ln FP_m$$

..... (4.2)

内臓Bの内部におけるひずみ：

$$\epsilon = 46.5 + 26.2 \ln FP_m$$

内臓Bの表面における主ひずみ：

$$\epsilon = 1000 + 227 \ln FP_m$$

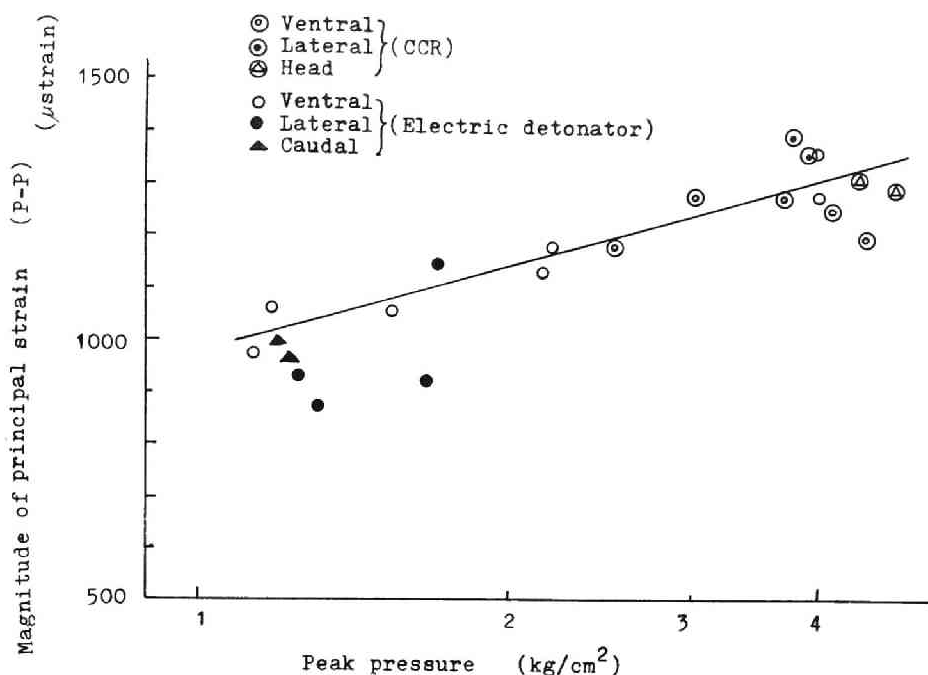


Fig.4.24(3) Relation between peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of principal strain on the surface of its viscera B.

一方、第3章第3.3節において述べたように、へい死魚あるいは極度のけいれん状態の魚が出現する場合の水中圧力波のエネルギー密度の下限値は魚の種類によって異なるが、先に示したように、たとえばコイの1年生魚についてのこの下限値はほぼ 140 J/m^2 である。そこでいま、電気雷管を爆源として用いた場合について 140 J/m^2 のエネルギー密度をもつ水中圧力波が模型魚に加わった時の腹腔内圧力波の圧力最高値を(4.1)式より求め、さらにその結果を(4.2)式に代入して腹腔内に生ずるひずみの値を求めてみると、内臓Aの内部に生ずるひずみは $326 \mu\text{strain}$ 、内臓Aの表面に生ずる主ひずみは $3230 \mu\text{strain}$ 、内臓Bの内部に生ずるひずみは $92.2 \mu\text{strain}$ 、内臓Bの表面に生ずる主ひずみは $1400 \mu\text{strain}$ となる。したがって、内臓表面に生ずるひずみはその内部に生ずるひずみにくらべてはるかに大きいことがわかる。また、腹腔内に生じた圧力の対数値の増分に対するひずみ振幅の増加率 $\Delta \epsilon / \Delta \ln F P_m$ の値は内臓Bより内臓Aの方が大きい。実際の魚においては、模型魚における内臓Aは腎臓に、内臓Bは肝臓や消化器に相当するものであるが、第2章において述べたように、実魚を対象とし

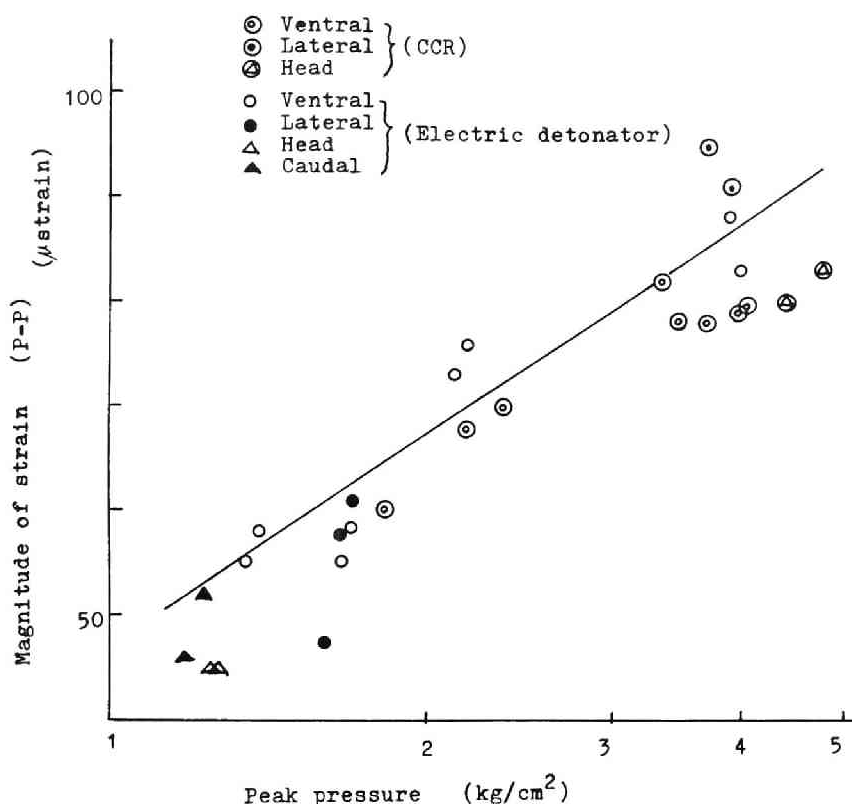


Fig.4.24(4) Relation between peak pressure of pressure wave in the abdominal cavity of model fish and magnitude of strain on the inside of its viscera B.

た実験結果からも、水中圧力波の強さの増分に対する内臓器官の損傷程度の増加率は腎臓について得られたその値が消化器や肝臓について得られたその値よりも大きいという結果が得られており、上記のひずみ測定結果からもこのことが裏づけられたといえる。

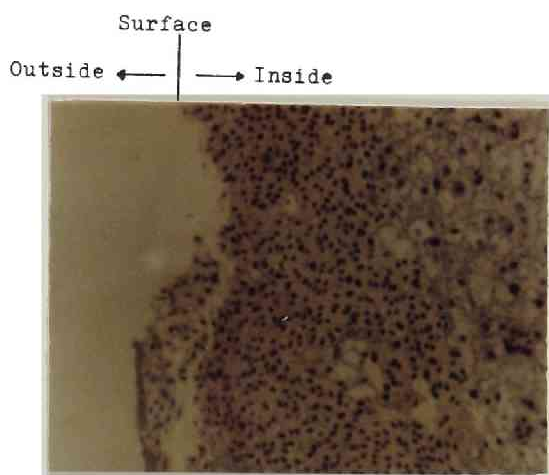
第4・5節 魚類の損傷機構について考察

本節では以上に述べた実験結果を総合して、水中圧力波を受けたときの魚体の応答と魚の内部器官に生ずる損傷との関係について考察する。

まず、水中圧力波により損傷を受けた魚の内部器官の組織の顕微鏡写真の一例をFig. 4. 25に示す。Fig. 4. 25によれば、器官内部の組織には全く異常は認められず、表面の組織が剝離しているのみである。このように、一般に水中圧力波を受けることにより魚に生ずる内部器官の損傷は、非常に強い水中圧力波を受けた場合を除けば、すべて臓器の表面にあらわれ、表面の組織が充血したり破壊されたりしており、臓器の内部の組織には異常は認められない。このよう

な現象が生ずるのは、4.4.3項で明らかにしたように、水中圧力波を受けた場合に魚の内部器官に生ずるひずみの大きさが、臓器内部におけるよりその表面においてはるかに大きいことによるものと考えられる。

内臓に生ずるひずみの大きさは腹腔内圧力波の圧力最高値と正の相関関係があることを



先に指摘した。また一方、Fig.4.25 Microphotograph of tissue of viscera of fish injured due to underwater pressure wave. Fig. 4.20 によれば、

同じエネルギー密度をもつ水中圧力波を受けた場合に、ハマチの腎臓と肝臓の位置で測定される圧力波の強さにはほとんど差がなく、したがって腹腔内に生ずる圧力波の強さには臓器の位置による差が小さいと考えられる。それにもかかわらず同一の水中圧力波を受けた場合に生ずる内部器官の損傷程度に差が生ずるのは、内部器官を構成している組織の力学的強度に差があることや、構造の違いなどがその原因をなしているものと考えられる。

また、Fig. 4.21 から明らかなように、模型魚を用いた実験の結果では、内臓表面とその内部のそれぞれにおいて測定された圧力波の強さにはほとんど差が認められない。しかし、Fig. 4.24 に示したように、ひずみの振幅の大きさは、内臓内部におけるよりも表面におけるそれではるかに大きい。これは、臓器内部と表面では拘束状態に差があるためであり、拘束の少ない表面ではよりひずみやすい状態にあるためと考えられる。

以上に述べたように、魚の内部器官の損傷程度は、内部器官に生ずるひずみの大きさに依存しているものと考えられる。その上、このひずみの大きさは、水中圧力波を受けることにより魚の腹腔内に誘発される圧力波の圧力最高値に依存し、さらにこの圧力最高値は水中圧力波のエネルギー密度と正の相関関係をもっている。このように考えれば、魚の内部器官の損傷指数が水中圧力波のエネルギー密度と強い相関関係にあることを示した第3章の実験結果を矛盾なく説明することができる。

つぎにTable 4.2 およびTable 4.3 に示したように、マダイ、カサゴ、ハマチ、アイナメ、ウマヅラハギおよびアナゴの6魚種について、それぞれの肝臓側面において測定した圧力波の圧力最高値には、魚種による差がほとんど見られない。しかし、本州四国連絡橋公団が大三島

や坂出沖で実施した実験^{1), 2)}によって明らかにされたように、同じ強さの水中圧力波を受けたときのこれらの魚の損傷指数には差があり、マダイやカサゴにくらべればアイナメやアナゴの損傷指数は小さい。そこで、その損傷の内容をさらに詳しく分析するために、マダイ、アナゴ、カ

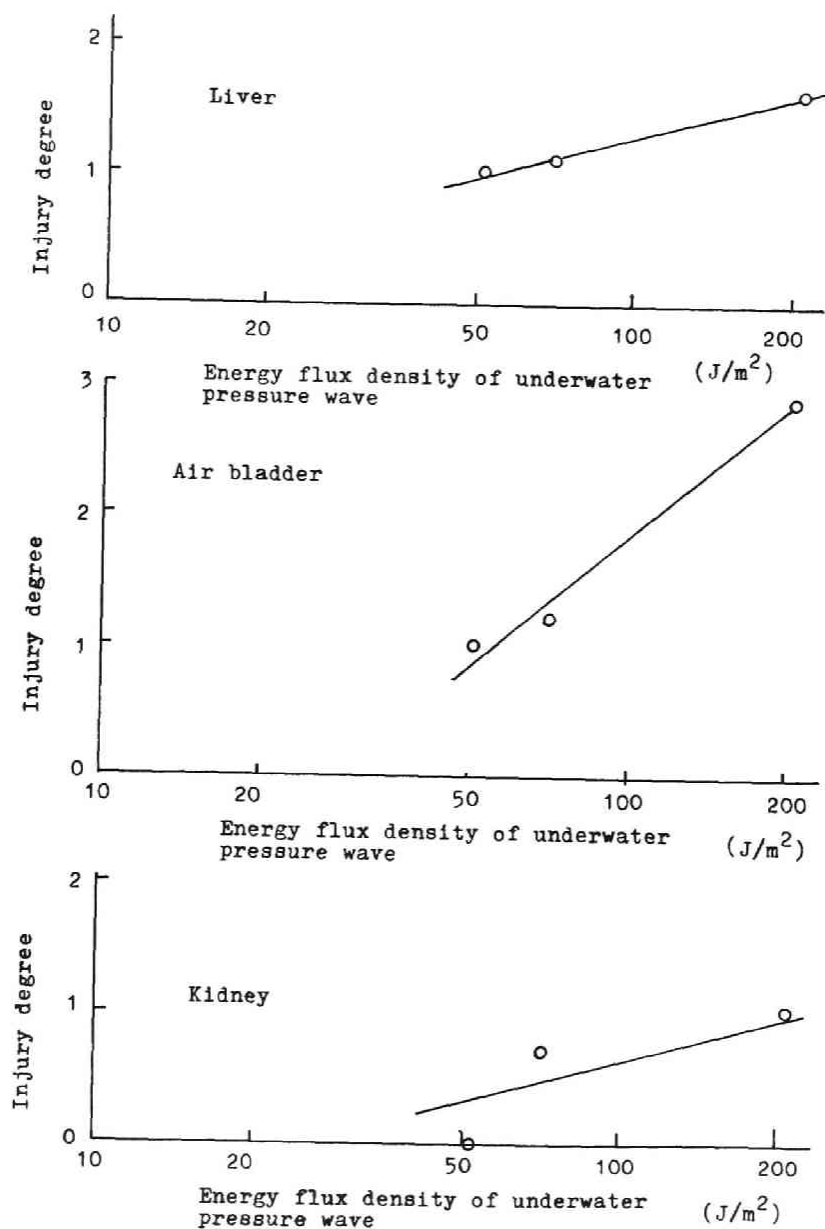


Fig.4.26(1) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and injury degree.
(Sea bream)

サゴおよびアイナメの4種の魚の肝臓，うきぶくろおよび腎臓のそれぞれについて求めた損傷程度と水中圧力波のエネルギー密度との関係をFig. 4.26に示した。これらの図から明らかなように，肝臓については，魚種による損傷程度にわずかな差しか認められないが，うきぶくろや腎

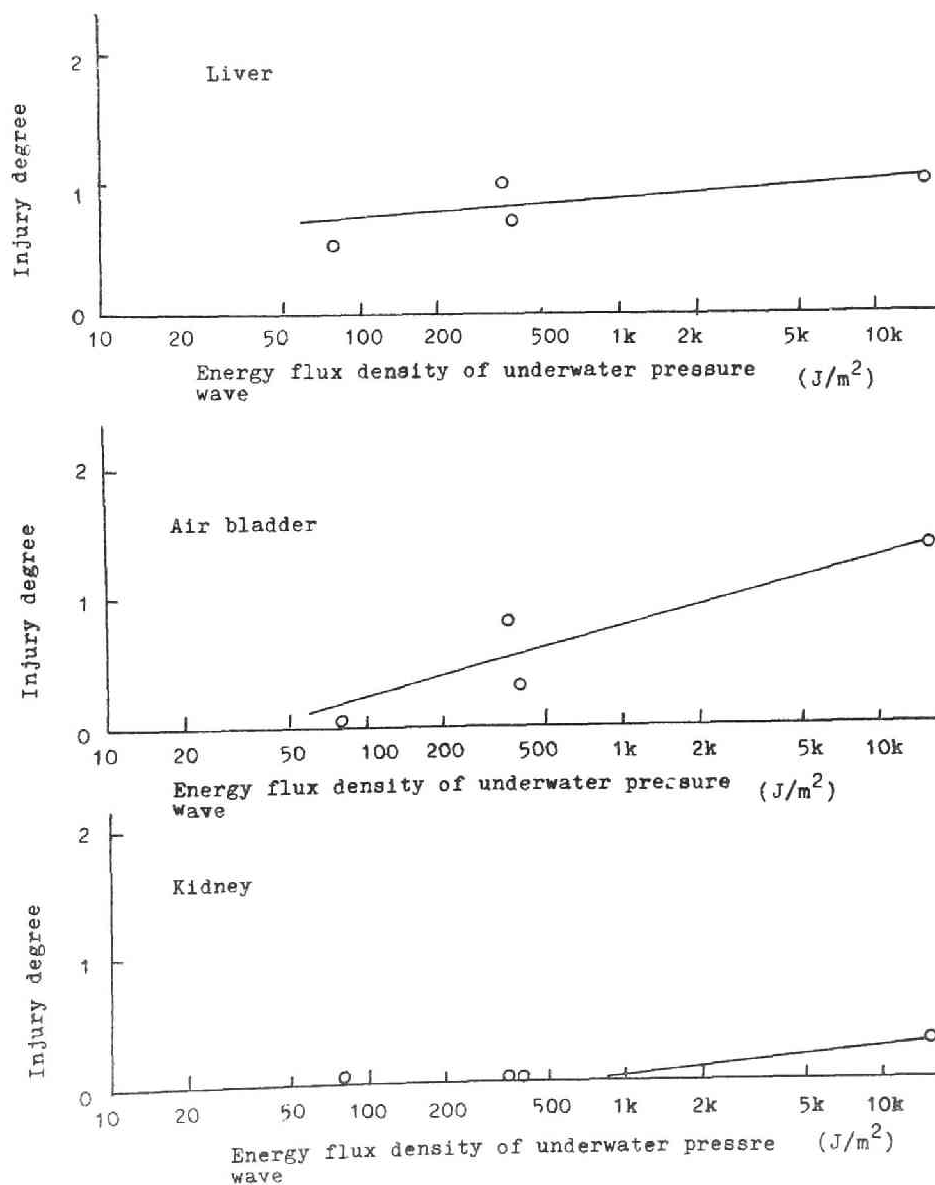


Fig.4.26(2) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and injury degree.
(Conger)

臓の損傷程度はマダイやカサゴの場合には大きく、アイナメ(うきぶくろはない)やアナゴでは非常に小さい。このように、これら4種類の魚の場合には、腹腔内に誘発される圧力波の圧力最高値やそれによって生ずる肝臓の損傷程度にはほとんど差がないにもかかわらずうきぶくろや腎

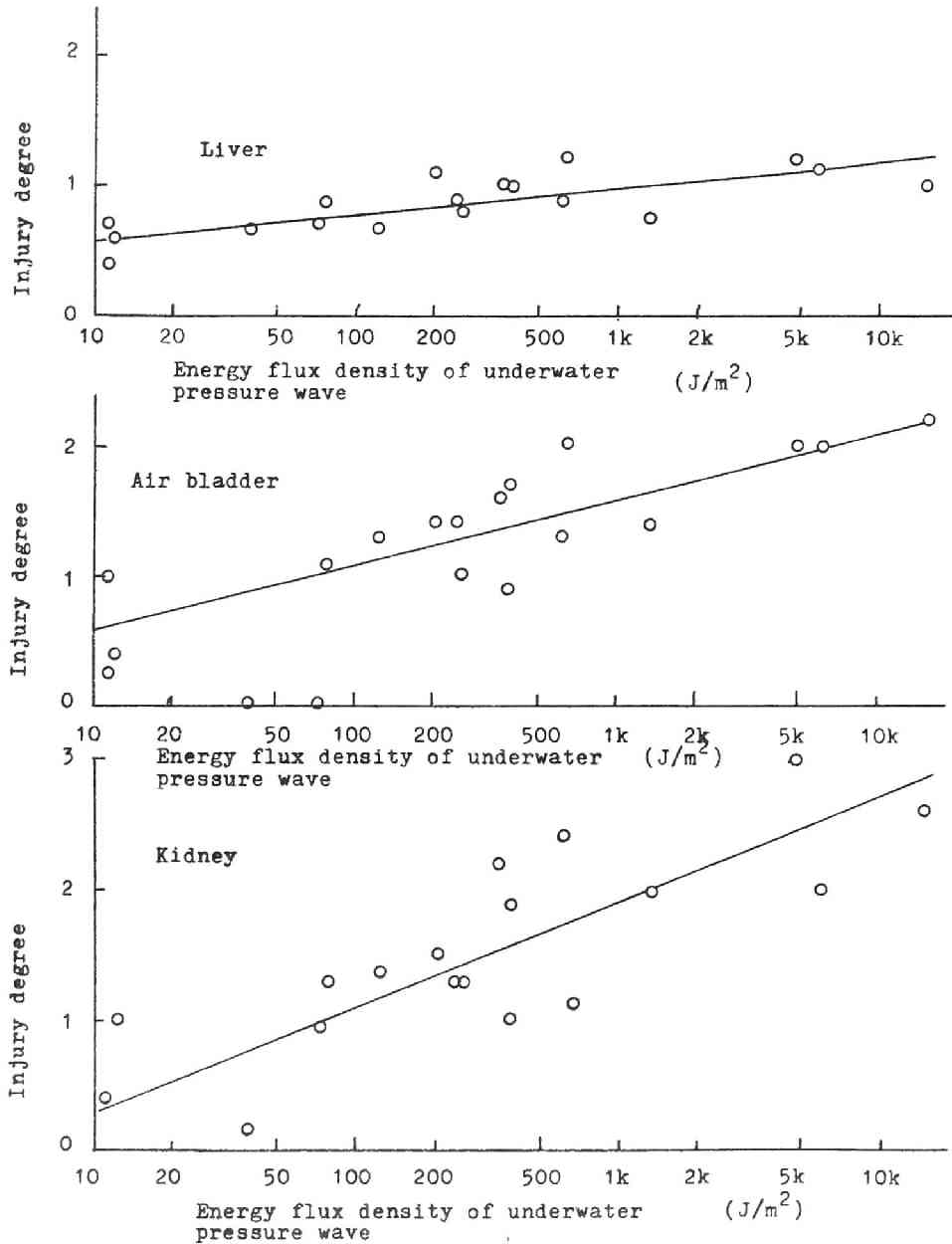


Fig.4.26(3) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and injury degree.
(Scorpionfish)

臓に生ずる損傷程度には大きな差が認められる。このことは、水中圧力波に対する魚の抵抗力の大小は、うきぶくろと腎臓が損傷を受け易いか否かに依存していることを示しており、これら両者の中でもとくにうきぶくろが重要な役割を果していることを意味している。

また、第3章において、パルス間隔が数百ミリ秒以内のくり返しパルスが魚に加わった場合には、内部器官の損傷程度に対してパルスのくり返しの影響がほとんど見られないことを指摘した。そこで、ここでさらにこの点についてももう少し検討してみる。

Table 4.8 に示したように、魚の腹腔内に誘発された圧力波のパルス幅は $0.6 \text{ mS} \sim 1.4$

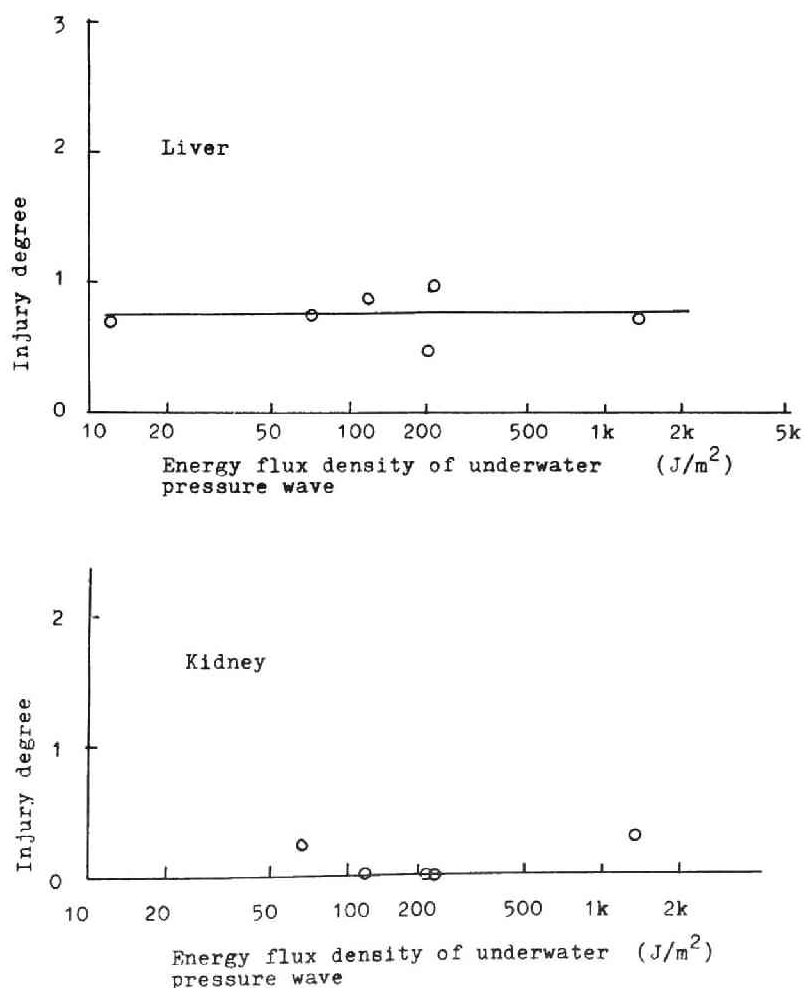


Fig.4.26(4) Relation between energy flux density of underwater pressure wave and injury degree. (Rock trout)

msである。一方、Fig.4.18に示したように、内臓について測定されたひずみの主要部の持続時間は15ms以下である。そのため、パルス間隔が15ms以上のくり返しパルスが魚に加わったとしても、腹腔内においては、それぞれのパルスによる圧力波やひずみが別々に分離して測定されることになるので、内部器官の損傷に対してはパルスのくり返しによる影響が現われないことになる。ところが、パルス間隔がこれよりも短かいくり返しパルスが作用した場合には、それぞれのパルスによって生ずる内臓のひずみが重なり合い、単独のパルスが作用した場合に内臓に生ずるひずみよりも大きくなることもあるので、この場合には魚の内部器官の損傷程度に対してパルスのくり返しの影響が現われてくる可能性がある。第3章に述べた実験では、パルス間隔が15ms以上としたくり返しパルスを作用させたので、実験結果にパルスのくり返しによる影響が認められなかったものと考えられる。しかし、その間隔が数百ミリ秒以上となるくり返しパルスを作用させた場合には、単独パルスを加えた場合にくらべて魚の損傷程度がやや増加したという第3章で述べた実験結果は、以上のようなひずみの重なりの有無のみを問題にした力学的な観点からは説明が困難であり、この現象にはなんらかの魚類に特有な生理的な特性が関与しているのではないかと推察される。

なお、以上に述べたことのほかに、水中圧力波を受けたときに魚体に生ずる加速度の最高値は、水中圧力波のエネルギー密度と密接な関係があることは先に述べたとおりであるが、このことを考慮すると、魚の内部器官に生ずる損傷には魚体に生ずる加速度も重要な役割を果しているものと考えられる。

第4・6節 結 言

本章では、実魚および模型魚を用いた実験により、魚が水中圧力波を受けた時にその腹腔内に誘発される圧力波ならびに魚体の加速度および内臓に生ずるひずみを測定した結果について説明し、さらに、これらの実験結果に対する考察により明らかとなった事柄にもとづいて、水中圧力波を受けた魚がどのような機構によって内部器官に損傷を受けるかについて考察した。

その結果、水中圧力波のエネルギー密度、腹腔内に誘発される圧力波の圧力最高値および内臓に生ずるひずみの大きさの3者の間には密接な相関関係が存在し、内臓に生ずるひずみの大小が魚類に生ずる損傷に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。そして、このような考え方をすれば、先に第1章から第3章に述べた生魚を用いて行なった実験により得られた結果をも矛盾なくよく説明できることを示した。さらに、水中圧力波により魚体に生ずる加速度も、魚の損傷に重要な役割を果しているものと考えられることを指摘した。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団，総合安全工学研究所：水中発破の安全性の検討（その3）報告書（1976）
- 2) 本州四国連絡橋公団，安全工学協会：水中発破による衝撃圧等報告書（1972）

世界的にみても、またわが国においても、現在すでに各種の海洋開発に対する要望が高まってきたており、それに伴ない海底岩掘削法の一手段としての水中爆破技術の開発と確立の必要性が強く認識されてきている。しかし、水中爆破を実施した場合には必然的に水中圧力波が生成し、これが周辺環境、とくに魚介類に対して悪影響を及ぼすために、それらに対する補償等の社会的な種々の問題を解決しなければならず、水中爆破の実施には実際上強い制約を受けることが多い。このように、水中爆破については、爆破技術そのものの研究も必要であるが、そのほかに、水中爆破に伴って発生する水中圧力波が周辺環境、とくに魚介類に対し、どのような影響を与えるかについて充分研究しておくことが必要となっている。そこで、著者は、今日までに系統的な研究がほとんど行われていない後者の問題に焦点を絞った研究を行なうことにした。そのためには、まず、各種の方法で、水中爆破を実施した場合に発生する水中圧力波の性状が明らかにされていなければならない。したがって、本研究では、まず最初に各種の方法で水中爆破を実施した場合に発生する水中圧力波の性状について研究し、それらの成果を第1篇の内容にとりまとめた。ついで、第1篇で明らかにしたような各種の性状をもつ水中圧力波が魚類に加えられた場合に、魚類にはどのような損傷が生ずるか、また魚類に生ずる損傷に対しては水中圧力波のもつ種々の特性のうちもっとも大きい影響を与える特性は何か、水中圧力波を受けることにより魚類はどのような機構により損傷を受けるのかなどについて研究し、それらの成果を第2篇にとりまとめて示した。ここで、本研究により得られた主な成果を結論的にとりまとめて示すと以下のとおりである。

まず、水中爆破に伴って発生する水中圧力波の性状についての第1篇での研究で得られた主な成果を要約すると、つぎのとおりである。

1. 火薬類を水中で宙吊り状態にして爆発させるいわゆる水中爆発により発生する水中圧力波については、今まで比較的研究の少なかった産業用火薬類を対象にして研究を行ない、発生する水中圧力波についてつぎの点を明らかにした。

(1) 爆源に電気雷管を用いた場合に発生する水中圧力波は、爆源に近いところでは方向性が認められ、圧力の最高値は伝播方向により差が生ずる。

(2) 爆源に火薬を用いた場合に発生する水中圧力波では、火薬の種類のみならず火薬を収納している容器の密閉強度が、発生する水中圧力波の圧力最高値のみならずその波形に対しても大きい影響を与える。

(3) 爆源に爆薬を用いた場合に発生する水中圧力波では、今回用いた爆薬の範囲内では、圧力最高値や波形に及ぼす薬種の影響はほとんど認められない。

(4) どのような種類の火薬類を爆源として用いても、それらの水中爆発により発生する水中圧

力波の圧力最高値 P_m (kg/cm^2) と薬量 W (kg) および爆源からの距離 R (m) との間には、次式で示す関係が成り立つ。

$$P_m = K \left(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.13}$$

ただし、 K は主として火薬類の種類によって定まる定数である。

(5) 一般に、火薬類の水中爆発により発生する水中圧力波は、切り立った鋭い波頭をもつパルス状の波形を示す。

2. 各種の水中せん孔爆破に伴って発生する水中圧力波については、水槽内の模型実験により基礎的な研究を行なうとともに、実際に海底岩盤を対象に実施された大規模な水中せん孔爆破に関する現場実験で計測された結果を解析し、これらの両面からの検討結果から、水中せん孔爆破に伴って発生する水中圧力波の性状について以下の点を明らかにした。

(1) 水中で無自由面のせん孔爆破を行なった場合に発生する水中圧力波は、岩盤内で生じた応力波が水中へ透過することにより生ずる圧力波、すなわち地盤一水圧力波であって、爆源に近いところでのこの圧力波の周波数は低い。

(2) 無自由面の水中せん孔爆破に伴って発生する水中圧力波の伝播経路に沿った方向での圧力は、波面に対し ϕ 方向の曲率の中心からの距離のほぼ 1.13 乗に反比例する。したがって、この関係を用いることにより、生ずる水中圧力波の圧力の近似値を求めることができる。

(3) 水中で一自由面のせん孔爆破を行なった場合に発生する水中圧力波は、上記の地盤一水圧力波のほかに、さらに爆破によって生じたきれつなどを通り、また破壊された岩塊の突出時に漏斗孔から爆発生成ガスが噴出する際、それらに伴って生ずる圧力波、すなわちガス圧力波が発生する。したがって、この場合に観測される水中圧力波には、地盤一水圧力波とガス圧力波の 2 つがともに含まれてくる。

(4) 一自由面の水中せん孔爆破に伴って発生する地盤一水圧力波の波形的な特徴は、無自由面の水中せん孔爆破の際に発生する地盤一水圧力波のそれらとほぼ同じである。

(5) 一自由面水中せん孔爆破に伴って発生するガス圧力波は、比較的鋭い立ち上がりをもつパルス状の圧力波形を示す。また、ガス圧力波は、伝播する方向角 θ に応じてその圧力値が変動し、 θ が大きくなるにつれて圧力値は小さくなる。したがって、爆源より直上方向に伝播していく水中圧力波については、地盤一水圧力波よりもガス圧力波が卓越して現われるが、 θ が大きくなる遠距離では、ガス圧力波の影響は薄れ、地盤一水圧力波が卓越して観測されるようになる。

3. 比較的水深の浅い海域で実施された大規模な海底せん孔爆破に伴ない発生した水中圧力波の計測結果を解析することにより、以下の点を明らかにした。

(1) 上記の 2 項において述べたように、水中で無自由面あるいは一自由面のせん孔爆破を実施

すれば、いずれの場合にも地盤一水圧力波が生じ、これが水中圧力波として伝播していくことは基礎研究で明らかにしたが、大規模な海底せん孔爆破に伴う水中圧力波についても、地盤一水圧力波の存在が確認された。

(2) 大規模な海底せん孔爆破に伴ない発生する地盤一水圧力波についてさらに詳しく検討した結果、この地盤一水圧力波は、比較的低周波成分で構成されるGround waveと高周波成分で構成されるWater waveの2つから成っていることが明らかとなった。また、Water waveの方がGround waveにくらべて距離減衰指数が小さいので、爆源に近いところではGround waveが卓越して観測されるが、遠距離ではWater waveが卓越して観測されるようになることを指摘した。なお、一自由面爆破の場合、Water waveの大きさは、爆源直上に生ずるガス圧力波の影響も受けているものと考えられる。

(3) 計測結果の解析により明らかにした上記の結果は、Pekerisらの行なった理論的研究の結果から予測される事柄とも矛盾せず、実験的にこれらを実証したものといえることができる。

つぎに、水中圧力波が魚類に及ぼす影響については、種々の観点からの研究が期待されるが、もっとも重要な問題の1つとして、魚類の損傷に及ぼす水中圧力波の影響の問題が考えられる。そこで、著者は、この問題について主として水槽実験により各種の基礎的研究を行ない、従来知られていなかった多くの事柄を明らかにすることができた。以下に得られた成果の概要をとりまとめて列記する。

1. まず最初に、水中圧力波を受けた魚の各内部器官に生ずる損傷の程度と重態魚の出現率との関係、および、魚に加わる水中圧力波の強さと魚の各内部器官の損傷程度との関係について基礎的に検討した結果、以下に示す事柄を明らかにすることができた。

(1) 魚にとっては、肝臓、心臓、うきぶくろおよび腎臓等の内臓器官は重要な器官であり、水中圧力波によりこれらの器官が著しく損傷を受けると、魚は重態魚となり、もはや正常状態には快復しない。

(2) 魚に加わる水中圧力波の強さが比較的小さい時には、心臓、うきぶくろ、腎臓ならびに骨格には損傷が見られないが、肝臓には多少の損傷が生じる。水中圧力波の強さが大きくなり、ある値を超えると、うきぶくろや腎臓の損傷程度が急激に増加し、その結果重態魚の出現率も増加する。魚がさらに強い圧力波を受けると、心臓や骨格にも損傷が見られるようになる。

(3) 水中圧力波を受けた場合に、重態魚が出現するか否かの限界圧力値は魚種によって差がある。また、当才魚は成魚にくらべて一般に水中圧力波に対する抵抗力が小さい。

2. 水中圧力波の受圧方向が魚の内部器官に生ずる損傷とどのような関係があるかについて検討した結果、影響の程度は魚種によってかなりの差異があるものの、各魚種に共通して認められる

特徴としては、以下の事柄をあげることが明らかになった。

(1) コイを除く他の供試魚については、一般に腹部から受圧した場合には腎臓の損傷が大きく、したがって、この場合の損傷指数が他の方向から受圧した場合のそれらにくらべてもっとも大きい。

(2) 肝臓の損傷は、腹側部から受圧した場合が、他の方向から受圧した場合にくらべて大きい。

(3) いずれの方向から水中圧力波を受けても、心臓や骨格は、他の内部器官にくらべて損傷を受けにくい。

(4) 魚種にかかわらず、一般に尾部から受圧したときの損傷は小さく、また、コイを除けば、頭部から受圧した時も損傷が少ない。

(5) コイの場合は、頭部から受圧したときは心臓の損傷、とくに静脈洞の破裂を起こすことが多いので、圧力最高値の大きい水中圧力波を頭部から受圧したときの損傷指数や重態魚の出現率が大きくなる。

3. 水中圧力波の圧力波形に関連するパラメータとして、圧力パルスのくり返しおよびパルス幅の2つを考え、このような水中圧力波の波形的な特性が魚類の損傷に対してどのような影響を及ぼすかについて検討した結果、つぎの事柄が明らかになった。

(1) 圧力パルスが魚類に対しくり返し加わった場合には、パルス間隔が魚に生ずる損傷と関連してくる。すなわち、同じ大きさの圧力パルスが100 m S以内の間隔で数回魚類に対しくり返し加えられても、その場合に生ずる魚類の損傷の程度は、たんにパルスが1回のみ加えられた場合のそれとほとんど差が認められない。しかし、その間隔が500 m S 前後以上の圧力パルスがくり返し魚に加えられた場合は、パルスが1回のみ加えられた場合にくらべて魚の損傷程度は大きくなっており、パルス間隔の大きい圧力パルスのくり返しは魚類の損傷を増加させる可能性がある。

(2) 魚の損傷指数と水中圧力波の圧力最高値との関係、魚に加えられる水中圧力波のパルス幅に応じて異なってくる。同様のことが、魚類の損傷指数と水中圧力波のインパルスとの関係についてもいえる。一方、魚類の損傷指数と水中圧力波のエネルギー密度との間には、水中圧力波のパルス幅には無関係に成立する一定の関係が認められる。したがって、水中圧力波のエネルギー密度を検討することにより、水中圧力波の波形のいかににかかわらず、魚類の損傷に及ぼす水中圧力波の影響をより明確に議論できることが明らかになった。その結果、たとえば、今回の研究において供試魚として用いたコイの場合にはほぼ 140 J/m^2 の、カサゴの場合にはほぼ 100 J/m^2 の、またスズキの場合にはほぼ 200 J/m^2 のエネルギー密度をもつ水中圧力波が加えられた場合には、これらの魚にはいずれもへい死に至る重度の損傷が現われはじめることがわかった。

4. 模型魚および実魚を用いた水槽実験を行ない、水中圧力波を受けた魚の体内に生ずる圧力波、

加速度およびひずみの大きさ等の力学的諸量を測定し、水中圧力波の諸性状と魚体内に生ずる力学的応答との関係について検討するとともに、それらの検討結果にもとづいて水中圧力波を受けた場合の魚類の損傷機構について考察した。その結果、以下のような事柄を明らかにすることができた。

(1) 魚に加わる水中圧力波のパルス幅が大きく異なっても、魚の腹腔内圧力波の圧力波形にはほとんど差は見られない。また、魚に加わる水中圧力波のエネルギー密度と魚の腹腔内圧力波の圧力最高値との間には比較的よい正の相関関係が認められる。

(2) ハマチの肝臓側面で測定された腹腔内圧力波と腎臓表面で測定されたそれとでは、波形および圧力最高値ともにほとんど差は認められなかった。また、模型魚の内臓表面と内臓内部で測定された腹腔内圧力波の間にも波形、圧力最高値ともほとんど差は見られなかった。そのため、腹腔内圧力波の大きさおよび圧力波形は腹腔内のどの場所でもほとんど同じであると考えられる。

(3) 腹腔内圧力波の圧力最高値と内臓のひずみの大きさとの間には非常によい相関関係が見られる。

(4) 腹腔内圧力波の圧力最高値の増加に対する内臓のひずみの増加率は、肝臓や消化器にあたる部分においてよりも腎臓にあたる部分においての方が大きい。また、内臓のひずみの大きさは、内臓内部より表面の方がはるかに大きい。

(5) 水中圧力波による魚の内臓器官の損傷は、そのひずみの大きさに依存していると考えれば、この力学的応答性を検討した実験結果を使って、生魚の実験によって得られた結果を矛盾なく説明することができる。

(6) 水中圧力波に対して強い抵抗力をもつアイナメやアナゴと抵抗力の弱いマダイやカサゴについて、腹腔内圧力波を比較すると大きな差は見られない。また、肝臓の損傷程度もこれらの魚種の間にほとんど差は認められないが、腎臓やうきぶくろの損傷程度に大きな差が認められる。そのため、腎臓やうきぶくろの損傷の受けやすさが水中圧力波に対する魚の抵抗力を決定し、これにはうきぶくろが重要な役割を果しているものと考えられる。

(7) 魚体内の加速度の大きさと魚に加わる水中圧力波のエネルギー密度との間にはよい相関関係が認められる。そのため、加速度も魚の損傷に影響を及ぼしているものと考えられる。

謝

辞

本研究は、恩師京都大学工学部教授伊藤一郎博士および横浜国立大学工学部教授福山郁生博士の御指導によ^てり行なったもので、終始身に余る懇切でいねいな御指導を賜った伊藤先生および福山先生に深甚の謝意を表します。

また、魚の解剖などについて、御指導および御協力下さった水産庁南西海区水産研究所阪口清次博士および水産庁淡水区水産研究所藤谷超博士に感謝します。

さらに、実験を手伝っていただいた横浜国立大学工学部福山研究室の皆様および海底せん孔爆破に伴う水中圧力波の計測結果の使用をお許し下さった本州四国連絡橋公団坂出工事事務所杉田秀夫所長他関係者の方々に感謝いたします。

